Experimentelle Untersuchung des Kuppelofen-Schmelzprozesses.

Dissertation

zur

Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs.

Vorgelegt von

Dipl.-Ing. Friedrich Hüser
aus Vohwinkel.

Genehmigt von der Königlichen Technischen Hochschule zu Breslau.

Referent: Professor O. Simmersbach.
Korreferent: Dr. E. Hollmann.

Düsseldorf
Verlag Stahleisen m. b. H.
1912

47718.

Experimentelle Untersuchung des Kuppelofen-Schmelzprozesses.

Dissertation

zur

Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs.

ACAD. LUGD. BAT. BIBL.

Vorgelegt von

Dipl.-Ing. Friedrich Hüser

aus Vohwinkel.

Genehmigt von der Königlichen Technischen Hochschule zu Breslau.

Referent: Professor O. Simmersbach.
Korreferent: Dr. E. Hollmann.

Düsseldorf
Verlag Stahleisen m. b. H.
1912

Meinem früheren Lehrer

Herrn **Professor Eichhoff**

als Zeichen meiner Dankbarkeit gewidmet.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41549813_0066

Der Kuppelofen* ist eine Erfindung des Engländers Wilkinson aus dem Jahre 1794.** Bis zu diesem Zeitpunkt und auch später noch waren die Eisengießereien den Hochöfen angelagert. Die noch vielfach mit Holzkohle betriebenen Hochöfen lieferten das ohne Umschmelzen vergießbare Eisen, dessen Eigenschaften dem Gießer für seine Zwecke hinlänglich bekannt waren. Die wenigen, meist der Nachbarschaft des Hochofens entstammenden Erze gewährleisteten eine gleichartige Zusammensetzung des Eisens.

Das Aufblühen des Maschinenbaues mit seinen gesteigerten Ansprüchen, die Entwicklung des Verkehrswesens, das Heranziehen fremder Erze, die Einführung des Koks im Hochofenbetrieb und die sehr viel größeren Abmessungen des letzteren verdrängten die Gießereianlagen aus dem nächsten Umkreis der Hochöfen. Damit wurde die Daseinsberechtigung des Kuppelofens geschaffen.

Daß man diesen zunächst nach dem Vorbild des Hochofens betrieb, war naheliegend. Bei hoher Windspannung und engen Düsen wurde das Eisen mit reichlichem Kokszuschlag geschmolzen. Die stark kohlenoxydhaltigen Ofengase verbrannten an der Gicht mit großer Flammenbildung. Das Einschmelzen wurde erzielt ohne großen Eisenabbrand, aber 20 % Brennmaterial waren nichts Ungewöhnliches. Erst die sechziger und siebziger Jahre des vorigen Jahrhunderts schufen hier einen Wandel der Verhältnisse; aber wie Ledebur in seinem Aufsatz† „Der Gießereibetrieb am Ende des 19. Jahrhunderts“ sagt, „gelangte man mehr auf dem Wege des Versuchs als auf Grund theoretischer Erwägungen nach und nach ans Ziel und erkannte erst allmählich klarer die dabei zu erfüllenden Bedingungen“, nämlich: reiche Windmenge, geringe Spannung, weite Düsen, dichter Koks.

Der erste Ofen wurde von Schmahel* nach diesen Grundsätzen in der Kgl. Eisengießerei in Berlin erbaut und war 20 Jahre hindurch vorbildlich.

Heute sind uns die Lehrsätze der Feuerungskunde geläufig; wir nehmen einen etwas größeren Abbrand des Eisens in Kauf und suchen die Brennstoffmenge herabzudrücken, indem wir die Verbrennung möglichst vollkommen gestalten, d. h. CO_2-Bildung anstreben. Ueber die Menge verschiedener Ofentypen, die sich im Laufe der folgenden Jahrzehnte herausbildeten, um sich dem gesteckten Ziele zu nähern, geben unsere Lehr- und Handbücher des Gießereiwesens Aufschluß. Der Schmelzgang, wie er sich im Kuppelofen abspielt, der auf den ersten Blick so einfach erscheinen mag, bietet auch heute noch ein ergiebiges Arbeitsfeld für die Untersuchung. Wenn man von einigen verdienstvollen Forschern der letzten Jahrzehnte auf diesem Gebiet, wie Dürre, Ledebur, Wüst absieht, so findet man, daß erst seit etwa zehn Jahren der Kuppelofen das wissenschaftliche Interesse innerhalb eines weiteren Kreises von Gießereileuten gefunden hat, das ihm gebührt und für seine weitere Entwicklung notwendig ist.

Seitdem hat sich in technischen Zeitschriften und zahlreichen Gießereibüchern viel Material zur Klarstellung der Ofenverhältnisse angesammelt. Diese Arbeiten leiden jedoch zum Teil an nicht zu großer wissenschaftlicher Exaktheit und tragen oft recht hypothetischen Charakter.

Gegenstand dieser Arbeit soll es sein, die thermischen und metallurgischen Vorgänge im Kuppelofen genau zu verfolgen. Auf Grund dieser Untersuchungen soll erkannt werden, wie die Praxis sich der Natur des Schmelzvorgangs im Kuppelofen am gesundesten anpaßt.

Zur Erzielung einer möglichst wirksamen Ausnutzung des Brennstoffs ist eine gasanalytische Kontrolle der Gichtgase von großem Wert. Gichtgasanalysen sind schon an verschiedenen Oefen

---

* Statt der sonst meist üblichen Bezeichnung Kupolofen wird in dieser Abhandlung der Name Kuppelofen gewählt. Die älteren französischen Oefen trugen eine Kuppel; daher der Name, der auch später bestehen blieb. Siehe auch Kirchner, Die Kupolöfen, 1891, S. 4.

** Kirchner, Kupolöfen. Gieß.-Ztg. 1912, S. 27.

† Z. d. V. d. I. 1899, S. 433.

* Dürre, Handbuch des Eisengießereibetriebes 1875, I. Bd., S. 358 und Beckert, Metallurgische Technologie, 1900, S. 100.

vorgenommen worden. Meist jedoch fehlt den Mitteilungen der Versuchsergebnisse die Angabe der Entnahmezeit der Proben. Der Erste, der nachdrücklich darauf hinwies, daß die Zeit nach dem Blasebeginn von Einfluß auf den Ausfall dieser Analysen sei, war Buzek.* In vorliegender Arbeit werden die Wind- und Gasverhältnisse genauer studiert.

Desgleichen die Ofentemperatur, worüber bei den verschiedenen Verfassern gießereitechnischer Aufsätze** bisher nur theoretische Erwägungen vorliegen. Es soll hier zum erstenmal unternommen werden, die Temperaturen innerhalb der ganzen Ofensäule durch pyrometrische Messung zu bestimmen.

Die ständige Kontrolle des Eisens vor und nach dem Schmelzen durch die chemische Analyse wird heute in vielen großen Gießereien ausgeübt. Diesem Umstande haben wir zu einem guten Teil die Erfolge unserer Gießereitechnik zu verdanken. Es ist bisher jedoch nicht bekannt geworden, daß man die Aenderung in der Zusammensetzung des Eisens und der Schlacke nebeneinander und fortlaufend während einer Schmelzdauer festgestellt habe. Die Untersuchung einer Reihe von Proben, die nach geringen Zeitintervallen dem Ofen entnommen wurden, wird hierüber Aufschluß geben.

Um die thermischen und metallurgischen Erscheinungen in ihrer Gesamtheit gut zu überschauen, soll der Versuch gemacht werden, den Stoff- und Wärmehaushalt des Kuppelofens zahlenmäßig festzustellen. Endlich werden einige Ergebnisse mitgeteilt über Versuche, den Schwefel, diesen gefährlichsten Begleiter des Eisens, an dem Uebergang an dasselbe zu hindern.

Beschreibung der Versuche.

Die Untersuchungen fanden statt an dem Kuppelofen Nr. 3 der Eisengießerei A. Borsig in Tegel bei Berlin, einem Krigarschen Ofen† aus dem Jahre 1898, wie ihn Abb. 1 darstellt. Der Ofenschacht ist zylindrisch und hat einen Durchmesser von 1000 mm. Die Beschickungssäule, gemessen von der Oberkante der hinteren Düse bis zur Gicht, hat eine Höhe von 3610 mm. Jeder Satz (jede Gicht) setzt sich zusammen aus 600 kg Eisen, 42 kg Koks und einem Kalkzuschlag.

Der Wind.

Vier Oefen erhalten den Wind aus einer gemeinsamen Leitung. Die Steuerung erfolgt durch Drosselklappen. Am Ofen 3 erfolgte die Windzuführung anfänglich durch vier um 90 ° versetzte rechteckige Düsen; später wurden, da die sich über jeder Düse bildenden Schlackenansätze den Ofen zu sehr verengten, die zwei seitlichen Düsen zugemauert. Der Ofen arbeitet jetzt mit zwei Düsen, deren Größe zusammen ein Zehntel des Ofenquerschnitts ausmacht. Ihre Abmessungen sind:

hintere Düse . . .	0,130 . 0,500	= 0,065	m²
vordere Düse . .	0,070 . 0,190	= 0,0133	m²
		0,0783	m².

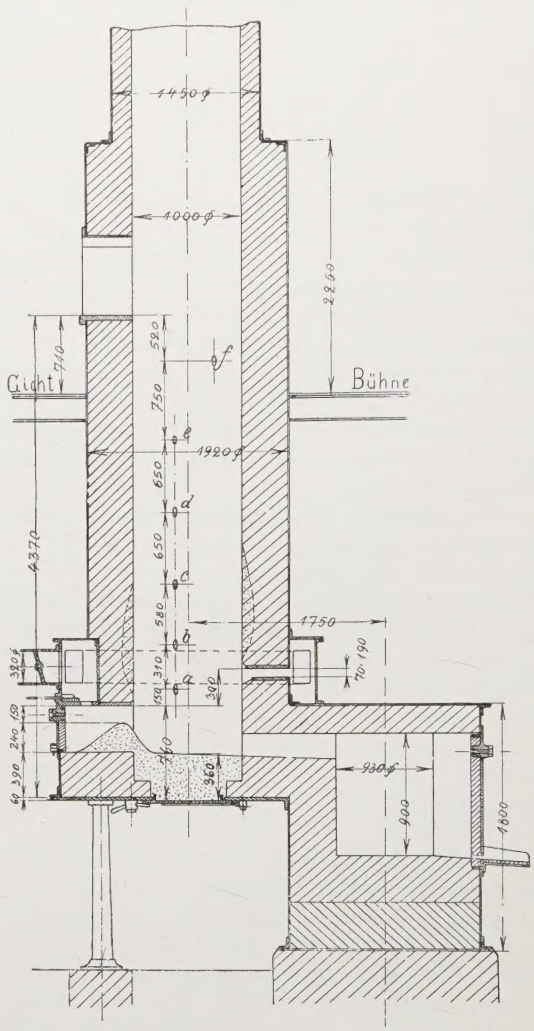

Abb. 1.

Die hintere Düse erhält den Wind unmittelbar vom Gebläse durch eine 10 m lange Leitung von 320 mm ϕ. Auf dem Umleitungswege zur Vorderdüse erleidet die Windspannung einen Verlust von 25 bis 30 mm WS (Reibungsverlust). Die Oberkante dieser Düse liegt 300 mm über derjenigen der hinteren.

Der Wind wird dem Ofen durch ein Krigarsches** Schraubengebläse zugeführt. Er passiert zwei Kniee bis zum Ofen, die beide kleine Spannungsverluste

* St. u. E. 1909, S. 712.

** Z. B. St. u. E. 1909, S. 280: 1600°; Gieß.-Ztg. 1899, S. 433: 1700°.

† Beck, Geschichte des Eisens, Bd. 5, S. 81: der älteste Krigarofen wurde Heinrich Krigar im Jahre 1867 in England patentiert. Ebenda S. 536: Krigars Ofen wurde verbessert im Jahre 1883 (Pat. Nr. 29 584).

** St. u. E. 1898, S. 70; Ihering, Die Gebläse, 1903. S. 250.

bewirken. Die Pressung des an den Ofen geförderten Windes steigert sich von 350 mm WS ausgehend in dem Maße, in dem die Düsen verschlacken und den Weg dadurch verengen. Nach einer Stunde mißt man eine Pressung von 600 mm WS, und diese bleibt dann zwischen 600 und 700 mm für den weiteren Verlauf des Schmelzens bestehen.

An drei Tagen wurde die Windmenge gemessen. Dazu diente das Fueßsche Mikromanometer,* dessen Anordnung bei der Messung aus Abb. 2 ersichtlich ist. Mit diesem Apparat mißt man die Geschwindigkeitsdruckhöhe. Er besteht aus einem Staudoppelrohr und dem eigentlichen Manometer. Letzteres ist wie andere Manometer eine Art kommunizierenden Rohrs, dessen einer Schenkel aus Glas eine Kalibrierung trägt. Der andere Schenkel ist gefäßartig erweitert. Die beiden Enden werden, wie aus der Abbildung ersichtlich ist, durch Gummischläuche mit dem Staudoppelrohr, das durch Korkverschluß in die Windleitung luftdicht eingebaut ist, verbunden. In der mit + bezeichneten Leitung

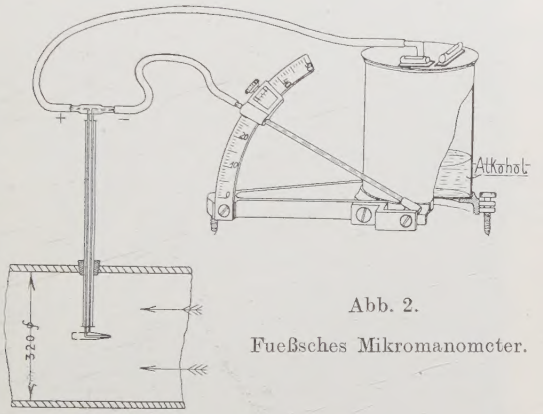

Abb. 2.

Fueßsches Mikromanometer.

tritt neben dem statischen Druck der dynamische oder Geschwindigkeitsdruck auf, während in der —-Leitung nur statischer Druck herrscht. Gemessen wird also die Differenz, der Geschwindigkeitsdruck.

Es wurde darauf geachtet, daß die Meßstelle, d. h. die Anbohrung der Windleitung an einer Stelle lag, die frei war von den vom Knie in der Leitung herrührenden Wirbeln.

Das Staurohr, das in dem Korkverschluß verschiebbar ist, wird nun in den Windleitungsquerschnitt an möglichst viele Stellen eines Durchmessers gebracht. Die Geschwindigkeit des Windes v ergibt sich aus der gemessenen Druckhöhe p nach der empirisch ermittelten Formel

$$v = 3{,}86 \cdot \sqrt{p}.$$

Das Ergebnis der Messung ist aus dem Schaubild erkenntlich. Die dicker ausgezogene Linie stellt graphisch die gefundenen Werte v dar; das Mittel von je zwei von der Mittelachse des Rohres gleich weit entfernt liegenden Meßstellen wurde der Berechnung der gesamten Windmenge zugrunde gelegt.

$$\left.\begin{array}{lll} 0{,}11^2 \cdot \pi \cdot 17{,}80 & \ldots & 0{,}6760 \\ (0{,}12^2 - 0{,}11^2)\ \pi \cdot 17{,}63 & \ldots & 0{,}1274 \\ (0{,}13^2 - 0{,}12^2)\ \pi \cdot 17{,}30 & \ldots & 0{,}1357 \\ (0{,}14^2 - 0{,}13^2)\ \pi \cdot 16{,}90 & \ldots & 0{,}1434 \\ (0{,}15^2 - 0{,}14^2)\ \pi \cdot 16{,}25 & \ldots & 0{,}1480 \\ (0{,}16^2 - 0{,}15^2)\ \pi \cdot 15{,}35 & \ldots & 0{,}1495 \end{array}\right\} \begin{array}{l}\text{zus.} \\ 1{,}3800\ \text{m}^3 \\ \text{bei } 20^0 \\ = 1{,}2855\ \text{m}^3 \\ \text{bei } 0^0.\end{array}$$

Diese Windmenge, 1,2855 m³/sek, ist eine Stunde nach Beginn der Blasezeit gemessen.

Beim Anfang des Blasens erhält der Ofen mehr Wind. Die Düsen verengen sich durch erstarrte Eisenspritzer immer mehr, je länger geschmolzen wird; außerdem nimmt die Schmelzsäule gegenüber ihrem Anfangszustand eine größere Dichtigkeit, also geringere Durchlässigkeit an, denn heruntertropfende Schmelzprodukte haften am Koks und an der Wandung. Diese Erscheinung ändert sich nach Verlauf einer Stunde nicht mehr erheblich. In dieser Zeit ist die Pressung vor dem Ofen von 350 auf etwa 600 mm WS gestiegen. Angestellte

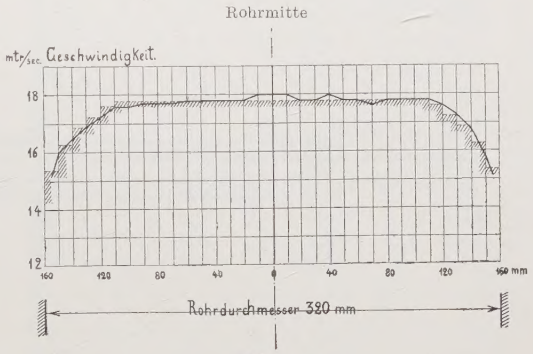

Abb. 3.

Messungen ergaben für das Ofeninnere ebenfalls eine Spannungszunahme, die nach der gleichen Zeit von einer Stunde nur noch unerheblich schwankte (s. weiter unten).

Wie sich die Windmenge an der Meßstelle vor dem Ofen mit der Zeit und der Zunahme der Windspannung ändert, darüber die Zahlentafel 4.

Zahlentafel 4.

Zeit nach Blasebeginn	Windspannung in mm WS	Mittl. Windgeschwindigkeit m/sek	Windmenge	
			m³/sek	m³/min
10′	420	17,90	1,342	80,6
15′	470	17,67	1,325	79,5
20′	503	17,50	1,311	78,6
25′	540	17,39	1,303	78,0
30′	560	17,27	1,295	77,6

Die Abnahme der bis an den Ofen geförderten Windmenge ist so zu erklären, daß das Schraubengebläse bei hohem Gegendruck weniger fördert, d. h. daß sein Wirkungsgrad mit zunehmender Druckhöhe geringer wird. Das ließ sich deutlich messen durch die Bestimmung der Windeintritts-

* Das Instrument wurde für die Versuche von der Firma R. Fueß in Steglitz bei Berlin in entgegenkommender Weise zur Verfügung gestellt. — Siehe auch St. u. E. 1911, S. 1752 ff.

geschwindigkeit vor dem Gebläse mit Hilfe eines Kugelschalen-Anemometers. Sobald die Drosselklappe in der Windleitung geöffnet wurde, also die Spannung des Windes abnahm, wuchs die angesaugte Windmenge, oft um die Hälfte ihres früheren Betrages.

Um die Windverluste kennen zu lernen, wurden an der Gicht des Ofens an fünf verschiedenen Tagen durch 500 mm tief in die Beschickungssäule eingesteckte Rohre Gasproben entnommen. Die Gasentnahme fand immer eine Stunde nach Beginn des Blasens statt. Siehe Zahlentafel* 5. In Gewichtsprozente umgerechnet ergibt das:

18 96 % CO_2	10 05 % CO
0 84 % O_2	70 15 % N_2

Zahlentafel 5.

CO_2	CO	O_2	N_2
11,3	15,3	0,3	73,1
11,8	12,8	0,6	74,8
15,5	7,1	1,1	76,3
12,7	9,0	1,4	76,9
10,3	13,4	0,7	75,6
13,9	10,4	1,3	74,4
14,6	7,4	1,5	76,5
15,5	7,7	0,5	76,3
11,9	8,7	0,3	79,1
12,4	9,7	0,6	77,3
11,3	13,4	0,4	74,9
15,8	3,8	1,2	79,2
12,7	11,2	0,6	75,5
11,4	15,3	0,8	72,5
13,2	12,9	0,9	73,0
13,6	11,9	0,3	74,2
Mittelwerte:			
13,0	10,6	0,8	75,6

In einem Kubikmeter Gichtgas vom Gewicht 1,3561 kg (spez. Gew. 0,0013561 bezogen auf Wasser = 1) sind enthalten 0,1286 kg C, 0,2765 kg O_2, 0,9510 kg N_2, oder in 100 Gewichtsteilen des Gases:

9,48	GT. C
20,37	GT. O_2
70,15	GT. N_2
100,00	GT. Gas.

70,15 GT. Stickstoff entsprechen 91,10 GT. atmosphärischer Luft, welche der Ofen erhält, wenn 9,48 GT. Kohlenstoff verbrennen, oder, da der Koks 89,01 % C enthält (s. S. 19), wenn 10,65 GT. Koks verbrennen.

1 kg Koks erhält also 8,550 kg = 6,62 m³ Wind.

Da der Ofen in dieser Zeit 14 Gichten zu je 42 kg Koks in der Stunde verbrennt, also in der Sekunde 0,163 kg Koks, entsprechend 1,0795 m³ Wind, das Gebläse der Messung gemäß aber 1,2855 m³ fördert, so sind 0,206 m³/sek als Verlust zu verzeichnen, d. h. es entsteht ein Windverlust von 16 % durch Undichtigkeiten in der Leitung, an den Drosselklappen, den Windkästen usw., ferner durch Oxydation von Fe, Si, Mn, P, S.

Dieser nach der ersten Stunde gemessene Verlust ist nicht gleichbleibend für die ganze Schmelzdauer. Im Anfang ist er geringer. Später nimmt er an Größe noch etwas zu und steigt bis auf 20 %.

Die Ofengase.

Um die Gasverhältnisse in den verschiedenen Zonen des Ofens zu studieren, wurde der Ofen an sechs Stellen, deren Höhenlage aus der Abb. 1 her-

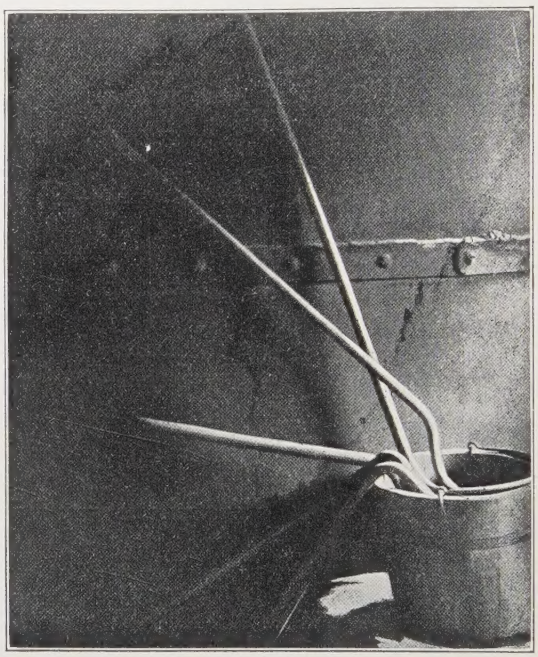

Abb. 6.

vorgeht, angebohrt, indem mit Hilfe eines Schneidbrenners die Blechwandung mit Löchern von 60 mm ⌀ versehen wurde und in das dahinterliegende Mauerwerk bis in das Ofeninnere ebenso starke Gasrohre dicht eingebaut wurden. Es war so dauernd die Möglichkeit geschaffen, die Gase durch Gasrohre, welche in diese Oeffnungen eingebaut wurden, zu entnehmen. Die nebenstehende Abb. 6 veranschaulicht diese Anordnung. Die Leitungen endeten alle in einem Kühlgefäß. Sie trugen vorn Verschlüsse, die erlaubten, mit Hilfe von Gummischläuchen und Quetschhähnen vermöge des im Ofen herrschenden Ueberdrucks Gas in beliebiger Menge zu entnehmen. Das Ergebnis entsprach zunächst in keiner Weise den Erwartungen. Die auf diesem Wege abgefangenen Gase zeigten an sämtlichen Bohrlöchern eine Zusammensetzung, die mit wenig Wahrscheinlichkeit derjenigen der Gase im Ofeninnern entspricht Die Kühlung der Enden erwies sich wegen der

* Vergl. diesen Mittelwert auch mit der auf S. 10 angeführten Durchschnittsanalyse der Gichtgase während einer ganzen Schmelzdauer. Bei allen Gasanalysen wird der Stickstoff aus der Differenz der übrigen Bestandteile zu 100 bestimmt. Das Argon, das ebenso unverändert bleibt wie Stickstoff, ist diesem zugezählt. Auch bei der Analyse der Luft: 78 1 % N_2 0 9 % Ar 21 0 % O_2 wird das Argon als Stickstoff betrachtet.

relativ geringen Gasgeschwindigkeit innerhalb der Rohre als überflüssig. Die Oeffnungen nach dem Ofeninnern zu verstopften sich sehr bald. In der

Zahlentafel 7.

Bohrloch	CO_2	CO	O_2	N_2
1	0,5	20,5	0,5	78,5
2	0,0	21,1	0,6	78,3
3	1,0	20,0	0,6	78,4
4	0,4	21,0	0,3	78,3
5	0,4	20,3	0,5	78,8
6	0,5	22,1	0,5	76,9

Zahlentafel 7 sind ein paar beliebig herausgegriffene Analysen angeführt; die dazugehörigen Gasproben wurden zu verschiedenen Zeiten dem Ofen entnommen.

Nachdem mehrere Wochen in dieser Weise vergeblich die Bestimmung der wirklichen Ofengase versucht worden war (vielleicht treten unkontrollierbare Reduktionserscheinungen an der Ofenwandung auf), wurde ein anderer Weg eingeschlagen.

Beim Füllen des Ofens wurden verschiedenartig lange Rohre in die Schmelzsäule eingebaut, die alle an der Gicht mündeten. Dieses Vorgehen ermöglichte die Bestimmung der Gase im oberen Teil der Säule bis zu Tiefen von etwa 1 m. Weiter unterhalb war diese Art des Abfangens unzuverlässig, das Rohr wurde bald glühend und konnte dann reduzierend auf das Gas einwirken, außerdem schmolz der untere Teil des Rohres bald ab.

Ebensowenig bewährte sich das Einbauen besonders verstärkter Rohre an den früheren Bohrlöchern, welche 200 mm ins Ofeninnere hineinragten. Die glühenden Enden wurden umgebogen und durch die abwärts gleitende Schmelzsäule an die Ofenwandung gedrückt. Der Erfolg war dann derselbe wie bei den früheren Versuchen.

Diese Unsicherheit war Veranlassung, einen Apparat zu konstruieren, wie ihn die Skizze 8 darstellt. Hierin bedeutet das Rohr a eine Schutzröhre, welche mit Ton fest in die Bohrung eingebaut ist. Am äußeren Ende trägt sie eine Stopfbuchse, in welcher das Rohr c geführt wird und vorwärts und rückwärts verschoben werden kann. Dichtungsmaterial ist Asbest und Graphit. Am anderen Ende von c ist ein Ansatzrohr b angeschraubt, das nach Bedarf, wenn es nämlich verstopft oder abgeschmolzen ist, ersetzt werden kann. Um dem Rohr im Ofeninnern Schutz gegen herunterfallende Eisenstücke zu gewähren, wurde über der Oeffnung an der Innenwand eine Brücke von 2 bis 3 Steinlagen Stärke eingebaut, die ein zu frühes Verschlacken der Oeffnung verhinderte. Diese Schutzbrücke mußte an jedem Schmelztag neu errichtet werden. Ebenso war ein häufiges Auswechseln des Rohres b erforderlich.

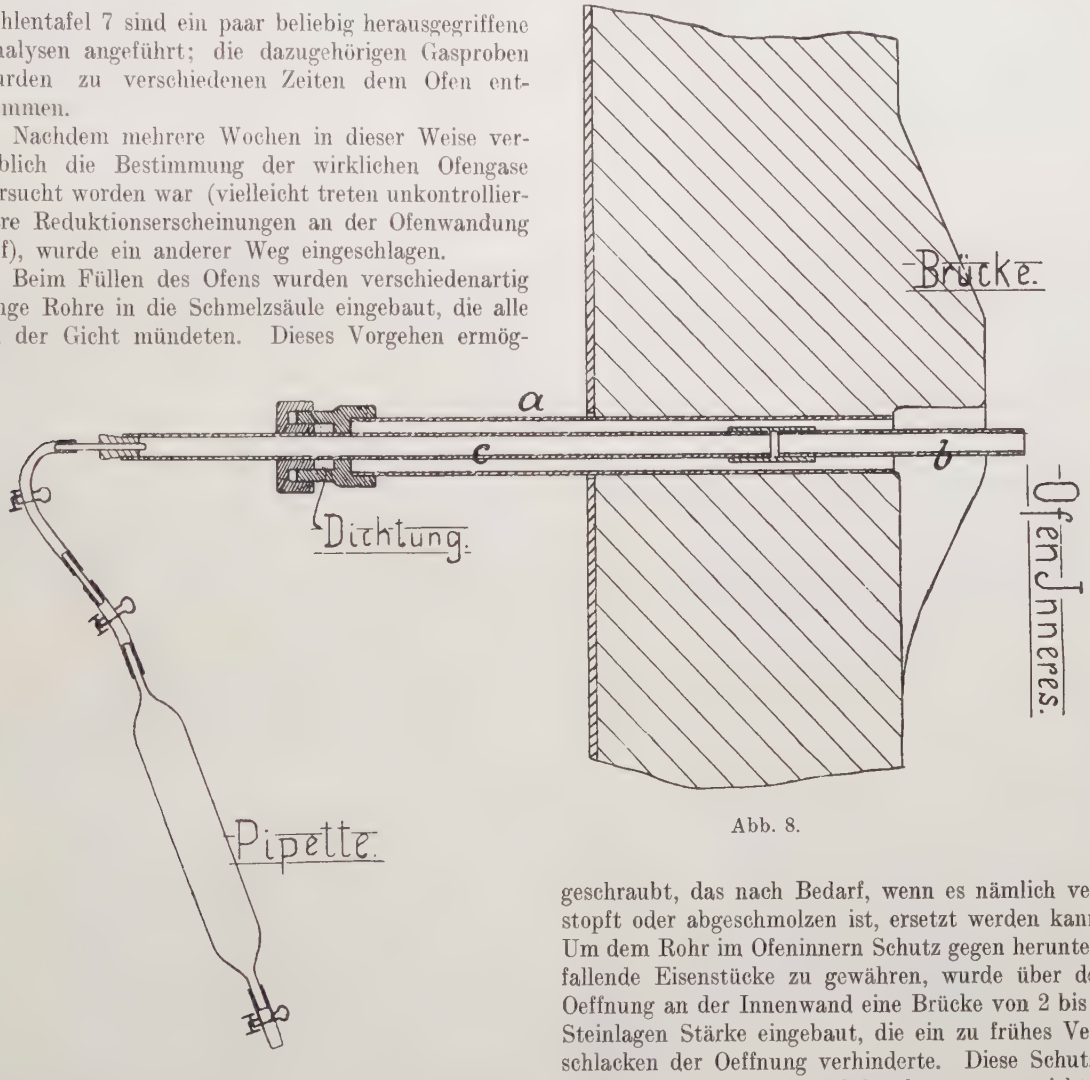

Abb. 8.

Durch häufig angestellte Versuche gelang jetzt die Ermittlung der unten mitgeteilten Ergebnisse. Nur unmittelbar in der Schmelzzone versagten alle angestellten Mittel, einwandfreie Gase zu erhalten. Hier setzten sich die Oeffnungen im Ofeninnern trotz aller Vorkehrungen vom Beginn des Blasens ab zu.

*

Für die Entnahme der Gasproben wurden stets solche Tage gewählt, an denen die Windzufuhr möglichst wenig geändert wurde, die Füllkoksmenge dieselbe war und der Ofenbetrieb in gleicher Weise verlief. Die Analysenergebnisse dürfen darum auf einen normalen Ofengang und Schmelztag bezogen werden. Das Ergebnis ist folgendes.

Bohrloch f:

520 mm unter der Gicht
3090 mm über den Düsen (hintere Düse).

Da die Beschickungssäule nicht immer genau mit der Gicht abschneidet, sondern einmal höher, ein anderes Mal etwas tiefer endet, die Gase ihre Zusammensetzung von f bis zur Gichtöffnung kaum noch ändern, so können die hier gefundenen Werte als Gichtgasanalysen gelten.

Siehe Zahlentafel 9.

Zahlentafel 9. Bohrloch f.

Zeit nach Blasebeginn	Windpressung in mm WS	Ort der Gasentnahme in der Schmelzsäule	CO_2	CO	O_2	N_2	Bemerkung
5′	370	Mitte	16,7	6,3	1,3	75,7	
		Rand	15,9	6,7	—	—	
10′	410	Mitte	12,8	9,0	0,5	77,7	Gichtfl.
		Rand	12,5	10,2	0,8	76,5	tritt auf
25′	510	Mitte	7,0	15,8	0,4	76,8	
		Rand	8,8	13,5	0,3	75,4	
42′	595	Mitte	3,4	18,3	0,4	77,9	
		Rand	8,8	14,9	0,5	75,8	
57′	580	Mitte	7,0	13,7	0,5	78,8	
		Rand	12,1	12,8	1,4	73,7	
1h 10′	580	Mitte	13,5	11,7	0,8	74,0	Gichtfl.
		Rand	14,0	11,3	0,7	74,0	sehr schw.
1h 30′	600	Mitte	13,8	10,3	0,7	75,2	
		Rand	14,4	10,3	1,3	74,0	
1h 45′	660	Mitte	15,2	8,5	1,4	74,9	
		Rand	15,6	7,2	1,5	75,7	
2h 05′	650	Mitte	14,4	10,2	1,0	74,4	
		Rand	14,9	11,3	1,2	72,6	
2h 25′	650	Mitte	15,0	8,4	0,7	75,9	
		Rand	14,6	9,7	1,5	74,2	
2h 45′	710	Mitte	13,9	9,6	1,6	74,9	
		Rand	14,9	9,3	1,6	74,2	
3h 20′	625	Mitte	14,9	8,9	1,5	74,7	
		Rand	14,7	8,5	0,7	76,1	
3h 45′	680	Mitte	14,5	9,4	1,5	74,6	Letzte
		Rand	—	—	—	—	Gicht
Mittelwerte:							
—	—	—	13,06	10,44	1,14	75,36	

Trägt man die gefundenen Werte in ein Koordinatensystem ein, dessen Abszissen die Zeit und dessen Ordinaten die Volumenprozente bedeuten, so erhält man die Schaulinien des weiter unten folgenden Diagramms 24, das dort näher besprochen wird.

Bohrloch e:

1270 mm unter der Gicht
2340 mm über Düsenoberkante (s. o.).

Die Gasspannung an diesem Bohrloch hängt hier wie bei allen darunter liegenden Bohrlöchern von der Höhe und Dichte der darüber befindlichen Beschickungssäule ab. Sie schwankt zwischen 75 und 40 mm WS.

Siehe Zahlentafel 10.

Zahlentafel 10. Bohrloch e.

Zeit nach Blasebeginn	Windpressung in mm WS	CO_2	CO	O_2	N_2	Bemerkung
3′	360	17,9	3,4	0,9	77,8	
13′	410	14,1	7,3	0,3	78,3	
23′	420	9,9	13,9	0,6	75,6	
40′	510	6,7	15,4	0,5	77,4	
1h 02′	485	13,4	11,3	1,3	74,0	
1h 15′	510	12,3	12,3	1,1	74,3	
1h 30′	510	13,9	9,4	1,0	75,7	
1h 45′	515	16,2	7,4	0,7	73,7	
2h 10′	490	14,7	8,2	1,3	75,8	
2h 25′	515	15,1	9,7	1,4	73,8	
3h 00′	510	16,1	8,9	0,6	74,4	Letzte Gicht

Bohrloch d:

1920 mm unter der Gicht
1690 mm über Düsenoberkante.

Die Pressung am Bohrloch d steigt in der ersten Stunde bis auf 140 mm WS. Sie schwankt dann zwischen diesem Wert und 110 mm. Der Füllkoks reicht im Anfang nahezu bis d.

Siehe Zahlentafel 11.

Zahlentafel 11. Bohrloch d.

Zeit nach Blasebeginn	Wind-Pressung in mm WS	CO_2	CO	O_2	N_2	Bemerkung
5′	360	15,8	5,2	1,7	77,3	
10′	375	9,5	16,2	0,2	74,1	
15′	390	8,0	19,4	0,3	72,3	
35′	515	7,6	19,3	0,3	72,8	
40′	530	11,3	12,6	1,6	74,5	
1h 00′	470	10,0	14,5	1,0	74,5	
1h 25	480	14,0	12,0	0,5	73,5	
1h 55′	575	14,8	10,2	0,9	74,1	
2h 55′	140	14,6	10,1	1,4	73,9	
3h 25′	440	16,8	9,2	1,0	73,0	
4h 00′	440	16,7	7,5	0,5	75,3	
4h 10′	635	Die herunterbrennende Säule endet bei Bohrloch d				
4h 40′	—	—	—	—	—	Wind abgestellt

Bohrloch c.

2570 mm unter der Gicht
1040 mm über Oberkante Düse.

Die Gasspannung im Ofen steigt am Bohrloch c im Anfang proportional der Windpressung und schwankt dann zwischen 300 und 250 mm WS.

Siehe Zahlentafel 12.

Zahlentafel 12. Bohrloch c.

Zeit nach Blasebeginn	Wind-Pressung in mm W.S.	CO_2	CO	O_2	N_2	Bemerkung
3′	350	18,0	3,5	1,3	77,2	
6′	365	17,5	5,2	1,0	76,3	
15′	400	14,7	8,8	1,1	75,4	
18	465	9,5	15,1	1,0	74,4	
21′	450	9,6	17,4	0,2	72,8	
23′	470	10,5	14,0	1,2	74,3	
30′	470	9,6	15,9	1,2	73,3	
40′	560	15,1	10,1	0,4	74,4	
45′	560	16,0	4,1	1,2	78,7	
1h 20′	550	15,6	7,8	0,9	75,7	
2h 00′	400	16,2	7,3	1,6	74,9	
3h 00′	580	16,8	8,2	0,7	74,3	Letzte Gicht

Bohrloch b.

3150 mm unter der Gicht
450 mm über Düsenoberkante.

Die Spannung im Ofen steigt an dieser Stelle von etwa 240 mm WS im Anfang auf 450 mm WS nach $^5/_4$ Stunden und fällt dann wieder langsam ab. Nach zwei Stunden wurden z. B. 412 mm WS gemessen bei 660 mm Spannung vor dem Ofen. Das Ansteigen der Gasspannung ist auf denselben Umstand zurückzuführen, wie das Größerwerden der Windpressung, nämlich darauf, daß die Beschickungssäule während des Schmelzprozesses eine größere Dichte annimmt.

An diesem Bohrloch gelang es nach vielen vergeblichen Versuchen, die in der Zahlentafel 13

Zahlentafel 13. Bohrloch b.

Zeit nach Blasebeginn	Wind-Pressung in mm W.S.	CO_2	CO	O_2	N_2	
3′	325	19,5	2,4	0,9	77,2	
8′	380	17,7	2,0	0,7	79,6	
15′	423	16,9	0,1	2,3	80,7	
30′	442	18,8	1,3	0,4	79,5	
1h 00′	545	17,9	0,5	2,7	78,9	
1h 20′	690	18,4	2,5	1,1	78,0	
1h 30′	635	18,6	2,9	1,6	76,9	
2h 00′	660	18,3	1,3	0,9	79,5	
Nach 2h beginnt starke Verschlackung am Bohrloch b.						

angeführten Werte für die Gase an dieser Stelle zu erhalten. Besonders nach den ersten 1½ Stunden setzte eine stark hinderliche Verschlackung ein, die das Absaugen sehr erschwerte. Vor jeder Gasentnahme mußte der Wind abgestellt und die Oeffnung im Innern von Schlacke befreit werden. Nachdem dann der Ofen wiederum einige Minuten geschmolzen hatte, wurde Gas abgesaugt. Später blieb auch zeitweiliges Abstellen des Windes, Oeffnen des Bohrlochs und Durchstoßen der Schlackenwand im Innern erfolglos. Die zähe Schlacke floß sogleich wieder zusammen und verstopfte die Oeffnung.

Noch nachteiliger wirkte dieser Mißstand auf ein Bohrloch, das genau in Höhe der hinteren Düse angebracht war. Hier gelang es trotz vieler Anläufe nicht, einwandfreie Gasproben zu erzielen. Die Verschlackung setzte hier sofort mit Beginn des Blasens ein.

Schwefelbestimmung im Gichtgas.

Um den Schwefelgehalt des Gichtgases zu bestimmen, wurde durch die Gichtöffnung ein Rohr in die Schmelzsäule eingeführt und das Gas abgesaugt. Das Rohr reichte 400 mm in die Beschickung hinein, um nicht statt Gas ein Gasluftgemisch abzusaugen, und bestand in seinem unteren Ende aus Marquardtscher Masse. Aus diesem Material fertigte die Kgl. Porzellanmanufaktur für den vorliegenden Zweck einige Rohre von 600 mm Länge und 50 äußerem und 20 innerem ⌀ an. Ein solches Rohr bedurfte schonender Behandlung, um es vor dem Zerspringen zu bewahren, und mußte darum durch ein Eisenrohr armiert werden. Der Einbau in das Bohrloch f an der Gicht erwies sich darum später als besonders vorteilhaft. Das Gas wurde durch eine Vorlage mit Jodlösung bzw. Bromsalzsäure abgesaugt, darauf durch eine Reinigungsvorlage geleitet, um mitgerissene Teilchen aus der Absorptionsflasche festzuhalten, und das Gasvolumen durch eine Saugflasche gemessen. Absorbiertes SO_2 wurde bei Jodlösung durch Rücktitration des Jods, bei Anwendung von Bromsalzsäure durch Fällung als Bariumsulfat bestimmt. Die Absaugegeschwindigkeit betrug in der Stunde etwa 4 l. Das Ergebnis ist in der Zahlentafel 14 enthalten.

Zahlentafel 14.

Abgesaugtes Gasvolumen ltr.	gr. S	gr. SO_2	gr. S/m³ Gas
10,5	0,0093	0,0187	0,89
5,67	0,0055	0,0110	0,97
5,02	0,0054	0,0108	1,08
6,73	0,0065	0,0130	0,97

Im Mittel fanden sich im Gichtgas 0,978 grS/m³, welche als SO_2 vorhanden sind. Eine Probe mit Kadmiumazetat bewies die Abwesenheit von H_2S im Gichtgas.

Temperaturen im Kuppelofen.

Zum Messen der Temperaturen kam, soweit es möglich war, das Pyrometer von Le Chatelier zur Anwendung. Dazu wurde die früher zum Absaugen der Gase verwendete Vorrichtung benutzt, indem an dem Schieberohr an der Ofeninnenseite ein Pyrometerröhrchen aus Marquardtscher Masse von 300 mm Länge und 3 mm Wandstärke angebracht wurde. In dieses Rohr hinein kam das Platin - Platin

Rhodium-Element und es war nun eine Anordnung geschaffen, wie sie in der Abb. 15 wiedergegeben ist.

Die freien Enden des Elements wurden mit sorgfältig von Oxyd befreiten Klemmen mit Kupferleitungen von geringem Widerstand (2 mm ⌀) verbunden, die zum Millivoltmeter führten, das etwa 10 m abseits stand. Bei dessen Aufstellung wurde darauf geachtet, daß sich große Eisenmassen nicht in der nächsten Nähe befanden. Die Messungen nahmen, nachdem in der Behandlung der Pyrometer-Röhren am Ofen die nötigen Erfahrungen gesammelt worden waren — absoluter Schutz gegen Stoß, sehr langsames Einführen in den Ofen, Vermeidung schneller Erhitzung und Abkühlung — befriedigenden Verlauf. Zwar hatten die Versuche wieder sehr mit der Hemmung durch Schlackenansätze zu kämpfen, besonders in den unteren Ofenpartien, aber bis zum Bohrloch d gelang es, die Temperatur im Ofeninneren zu bestimmen. Beim Bohrloch e war erst $^5/_4$ Stunden nach Beginn ein Erfolg zu bezeichnen,

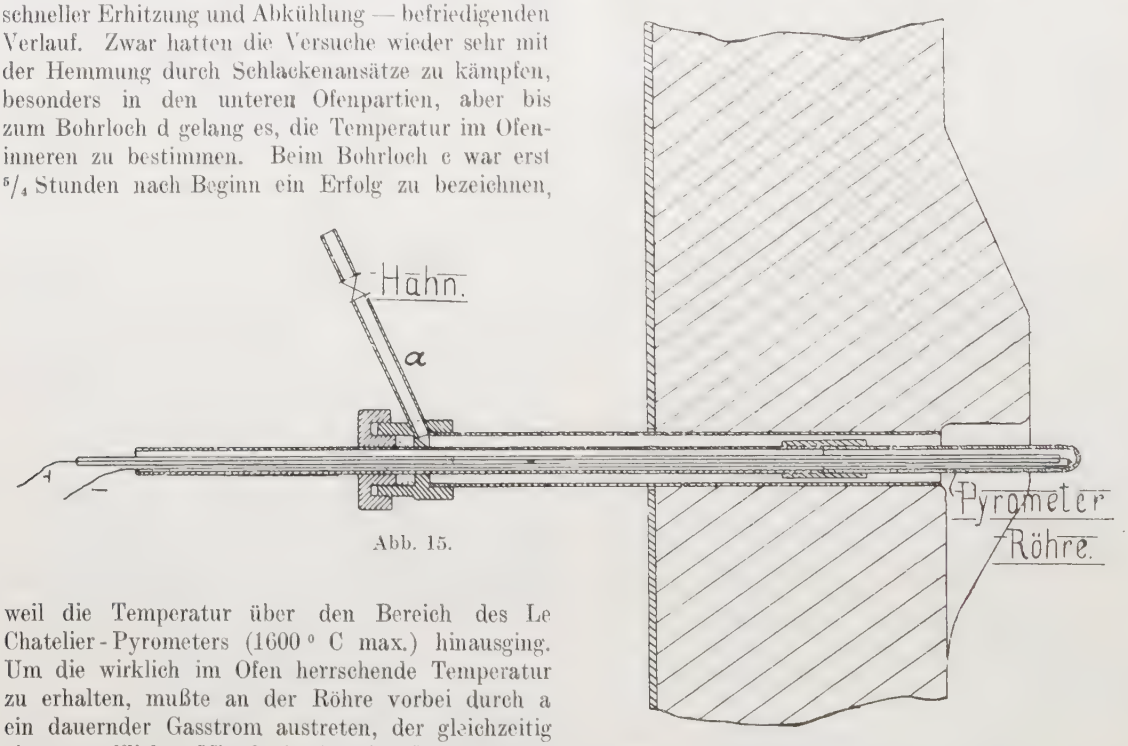

Abb. 15.

weil die Temperatur über den Bereich des Le Chatelier-Pyrometers (1600 ° C max.) hinausging. Um die wirklich im Ofen herrschende Temperatur zu erhalten, mußte an der Röhre vorbei durch a ein dauernder Gasstrom austreten, der gleichzeitig ein vortreffliches Mittel abgab, die Marquardtsche Röhre allmählich auf die Ofentemperatur zu bringen und darin dauernd zu erhalten. Dieser Gasstrom konnte durch einen an a angebrachten Hahn beliebig reguliert werden. Vor der eigentlichen Messung wurde der Beharrungszustand abgewartet, nach ihrer Beendigung die Röhre bis zur nächsten Messung langsam zurückgezogen, um einen zu schnellen Angriff durch flüssige Bestandteile im Ofen zu verhindern. Auf diese Weise gelang es dann, die Röhre für eine ganze Schmelzdauer zu erhalten. Bei allen diesen Temperaturmessungen mit dem Le Chatelier-Pyrometer ist zu beachten, daß infolge des langsamen Ein- und Ausführens der Röhre in dem Ofen die Messungen nur in gewissen Zeitabständen stattfinden konnten. Dauernd durfte die Meßröhre wegen der Gefährdung nicht im Ofeninnern bleiben. Wie früher wurde im Ofen eine Schutzbrücke aus Mauerwerk angebracht, die vor jeder Schmelzung erneuert werden mußte.

Es folgen die auf diese Weise festgestellten Temperaturen.

Bohrloch f.

520 mm unter der Gicht
3090 mm über Düsenoberkante.

Siehe Zahlentafel 16.

Während der ersten Viertelstunde herrscht an der Gicht eine sehr mäßige Temperatur, welche sich mit dem Pyrometer von Le Chatelier nicht feststellen läßt. Die Temperatur steigt an der Gicht sehr schnell auf ihren Höchstbetrag. Nach 10 Minuten tritt die Gichtflamme auf, nach einer halben Stunde mißt man am Bohrloch f Temperaturen um 900 ° C. Diese nehmen dann allmählich ab, in dem Maße, wie das Oberfeuer verschwindet. Die Temperatur bleibt aber dauernd über 775 °.

Zahlentafel 16. Bohrloch f.

Zeit nach Blasebeginn	Winddpressung in mm WS	Temperatur in ° C	Bemerkungen
20′	430	870	
25′	470	895	Große Gichtflamme
40′	520	905	
55′	600	870	
1h 15′	635	835	
1h 30′	630	855	
2h 00′	625	830	
2h 25′	580	805	
2h 50′	580	795	
3h 25′	580	780	
3h 55′	620	775	
4h 35′	580	805	
5h 15′	580	780	Letzte Gicht

Am Ende des Schmelzens, wenn die Ofensäule heruntergeht, steigt die Temperatur wieder erheblich. Das Oberfeuer nimmt jetzt an Umfang sehr zu, und es bildet sich eine große blendende Flamme, die stets von brauner Rauchbildung begleitet ist. Zehn

Zahlentafel 17. Bohrloch e.

Zeit nach Blasebeginn	Windpressung in mm WS	Temperatur in ° C	Bemerkungen
15′	310	1130	
30′	390	1045	
45′	490	1023	
1h 00′	485	1060	Gichtflamme ist fast verschwunden
1h 15′	476	1045	
1h 30′	510	1140	
1h 45′	525	1065	
2h 00′	530	1025	
2h 15′	560	1095	
2h 30′	625	1020	
2h 33′	630	—	Letzte Gicht
2h 45′	635	995	
Die herunterbrennende Säule passiert Bohrloch e			

wurde, um an den unteren Bohrstellen die Ofentemperatur zu bestimmen. Schon am Bohrloch c reichte in der ersten Stunde das Pt-PtRh-Element nicht aus; der Zeiger des Voltmeters schlug über die Skala hinaus aus, das Platin schmolz.

Zahlentafel 18. Bohrloch d.

Zeit nach Blasebeginn	Windpressung in mm WS	Temperatur in ° C	Bemerkungen
5′	360	1350	
20′	400	1390	
30′	490	1275	
45′	535	1282	
55′	480	1225	
1h 10′	470	1220	
1h 20′	480	1230	
1h 45′	570	1205	
2h 05′	600	1195	
2h 30′	615	1190	
3h 00′	140	1105	
3h 35′	640	1120	Letzte Gicht
4h 10′	635	1115	Schmelzsäulen-Oberkante passiert Bohrloch d
4h 20′	Ende des Blasens		

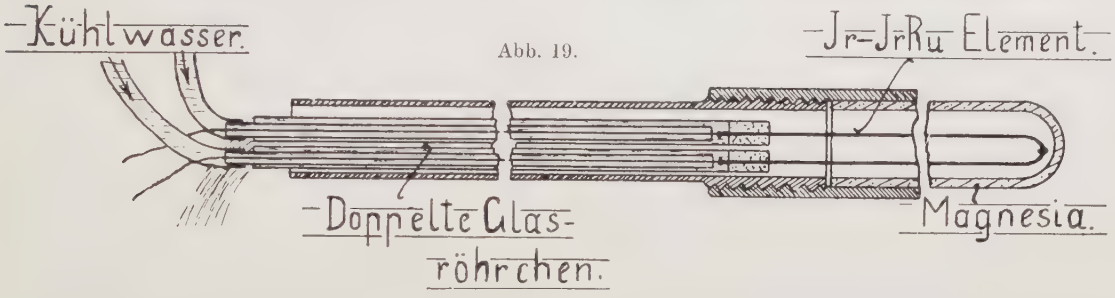

Abb. 19.

Minuten vor Abstellen des Windes war die Temperatur 1400 ° C.

Bohrloch e.

1270 mm unter der Gicht
2340 mm über Düsenoberkante.

Siehe Zahlentafel 17.

Am Bohrloch e ist auch ein langsames Abfallen der Temperatur erkennbar. Vergleicht man die Zahlenreihe, so fällt das große Schwanken der Temperatur auf (bis zu 85 ° C). Dies hat seinen Grund wahrscheinlich in dem wechselnden Vorbeimarschieren der Koks- und Eisengichten.

Bohrloch d.

1920 mm unter der Gicht
1690 mm über der Oberkante der Düse.

Siehe Zahlentafel 18.

Charakteristisch ist das Abfallen der Temperatur, sobald die Windzufuhr erheblich verringert wird (z. B. 3 Std. nach Blasebeginn). Die Einwirkung der eintretenden Abkühlung bleibt fühlbar, auch wenn die Windmenge später wieder vergrößert ist.

Bevor die für das Bohrloch c mit dem Le Chatelierpyrometer gefundenen Temperaturen mitgeteilt werden, ist das Verfahren zu erläutern, das angewandt

Die Versuche nahmen dann in der Weise ihren Fortgang, daß statt dieses Elements ein solches aus Iridium-IridiumRuthenium* eingebaut und das Marquardtsche Rohr durch ein solches aus Magnesia ersetzt wurde. Das Element war ein sehr spröder, vierkantig gewalzter Draht und zeigte sehr große Neigung zum Zerbrechen. Da die Länge des Elements nur 450 mm betrug, das Schieberohr der Meßvorrichtung eine solche von 1100 mm aufwies, wurde an den freien Enden des Elements Platindraht (0,5 mm ϕ) angelötet und durch doppelte Glasrohrleitungen, die bis über die Lötstelle hinein reichten, für dauernde Kühlung derselben gesorgt. Es konnte sich also an diesen Stellen kein Thermostrom bilden, denn das austretende Kühlwasser hatte sich nur um wenige Grad erwärmt. Ein Kontrollversuch ergab bei dieser Temperatur keinen Ausschlag.

Mit dieser (s. Abb. 19) für einen Betriebsofen höchst unbequemen Meßvorrichtung, die peinlichste Behandlung erheischte und viele Gefährdungsstellen aufwies, sind mehrtägige Versuche gemacht worden.

* Aus dem Metallographischen Laboratorium der Kgl. Bergakademie Berlin.

Das Ergebnis war jedoch ein unerfreuliches. Die gemessenen Temperaturen (1250°, 1420°, 1360°) entsprachen nicht denen des Ofens.

Erst die Anwendung des Wannerschen optischen Pyrometers führte zum Ziel.

Zur Verwendung gelangte ein noch unbenutztes neues Pyrometer, das vorher sorgfältig geprüft und auf die Normalzahl eingestellt wurde.

Solange bei diesen Messungen mit dem Wanner-Pyrometer die Schauöffnung im Ofen nicht durch Schlacke verstopft wurde, war der Meßapparat handlich und zuverlässig. Um durch eine Glasscheibe, welche an den Schaulöchern des Ofens hätte angebracht werden müssen, bei der Messung nicht beeinträchtigt zu werden, wurde das Photometer in ein eigens hergestelltes Gehäuse mit Stopfbuchsendichtung luftdicht eingebaut und dieses, wie Abb. 20 erkennen läßt, an das eingebaute Rohr im Ofen angeschraubt. Die Dichtung verhinderte das Austreten der heißen Gase aus dem Ofen; das Instrument war mithin ungefährdet. Eine Brücke im Ofeninnern (a) sorgte wieder dafür, daß nicht allzufrüh Verschlackung eintrat.

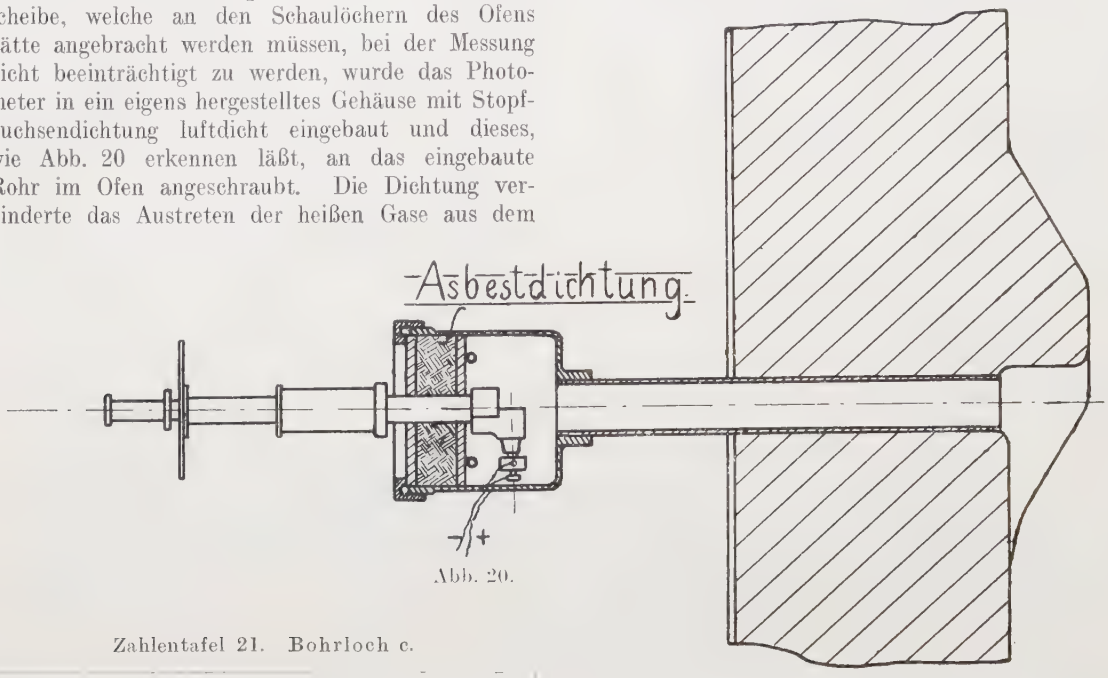

Abb. 20.

Bohrloch c.

2570 mm unter der Gicht
1040 mm über der Düsenoberkante.

Siehe Zahlentafel 21.

Hier steigt die Temperatur sehr hoch; dank guter Vorwärmung erfolgt dieser Aufstieg schnell. Nach 22 Minuten hat der Ofen schon 1730°. Das sind ungefähr 500° über der Schmelztemperatur des grauen Roheisens. Wie früher, so gilt auch hier, daß die Temperatur fällt, sobald die Windzufuhr verringert wird (1^h 55^m).

Zahlentafel 21. Bohrloch c.

Zeit nach Blasebeginn	Winddpressung in mm WS	Temperatur in °C	Bemerkungen
6′	340	1255	Wanner-Pyrometer
7,5′	350	1340	,, ,,
9′	360	1453	,, ,,
11′	365	1621	,, ,,
15,5′	375	1710	,, ,,
19′	375	1730	,, ,,
22′	375	1730	,, ,,
25′	385	1710	,, ,,
30′	435	1637	,, ,,
34′	450	1621	,, ,,
38′	475	1592	,, ,,
45′	530	1542	,, ,,
55′	580	1525	,, ,,
1^h 00′	580	1500	,, ,,
1^h 10′	450	1420	Lechatelier-Pyrometer
1^h 30′	450	1434	,, ,,
1^h 55′	350	1396	,, ,,
2^h 30′	630	1415	,, ,,
2^h 50′	640	1425	,, ,,
3^h 00′	340	1320	,, ,,
3^h 15′	650	1370	Letzte Gicht
3^h 25′	600	1385	Lech.-Pyrometer
3^h 35′	600	1385	,, ,,
3^h 45′	600	1380	,, ,,
4^h 00′	—	—	Ende des Blasens

Bohrloch b.

3160 mm unter der Gicht
450 mm über der Düsenoberkante.

Siehe Zahlentafel 22.

Zahlentafel 22. Bohrloch b.

Zeit nach Blasebeginn	Winddpressung in mm WS	Temperatur in °C	Bemerkungen
′	385	1543	Wanner-Pyrometer
5′	395	1566	,, ,,
8′	405	1596	,, ,,
15′	415	1637	,, ,,
17′	420	1653	,, ,,
25′	480	1738	,, ,,
30′	550	1740	,, ,,
35′	545	1732	,, ,,
38′	550	1740	,, ,,
45′	575	1730	,, ,,
—	—	—	Verschlackung
4^h 30′	500	1592	Wanner-Pyrometer
4^h 40′	550	1621	,, ,,

Es gelang hier leider nicht, für längere Dauer die Oeffnung im Ofen vor Verschlackung zu bewahren. Selbst partielle Verschlackung beeinträchtigt die Messung. Jedoch wurde die Höchsttemperatur 1740 ° gemessen, wesentlich höher dürfte sie wohl nicht steigen.

Daß auch an dieser Stelle, oder daß gerade hier die Menge des Windes einen starken Einfluß hat, besagen folgende Zahlen: An einem Tage, nachdem die Pressung des Windes eine Zeitlang 480 mm WS betragen hatte, wurde eine Temperatur von 1683 °, dann aber, als drei Minuten lang eine Pressung von 125 mm geherrscht hatte, 1532 ° gemessen.

Die zwei letzten Angaben in der Zahlentafel wurden ganz am Schluß des Blasens bestimmt, nachdem der Schlackenansatz im Innern bei abgestelltem Wind zu wiederholten Malen durchstoßen worden war. Ihre Richtigkeit kann nicht zuverlässig verbürgt werden.

Bohrloch a.

3460 mm unter der Gicht
150 mm über der Düsenoberkante.

Die hier folgenden Werte für das Bohrloch a werden mit Vorbehalt wiedergegeben, da keine Gewißheit darüber zu erlangen war, ob nicht Schlackenansätze, die ja bei der hohen Temperatur auch Weißglühhitze ausstrahlen, die Schauöffnung maskierten und die Beobachtung beeinträchtigten.

Siehe Zahlentafel 23.

Zahlentafel 23. Bohrloch a.

Zeit nach Blasebeginn	Windpressung in mm WS	Temperatur in ° C	Bemerkungen
0′	—	1425	Vor dem Blasen Wanner-Pyrometer
5′	360	1592	,, ,,
8′	365	1542	,, ,,
10′	375	1621	,, ,,
11′	380	1607	,, ,,
15′	385	1640	,, ,,
17′	385	1621	,, ,,
18′	410	1607	,, ,,
25′	445	1621	,, ,,
27′	460	1653	,, ,,
30′	480	1613	,, ,,
33′	495	1621	,, ,,
35′	495	1692	,, ,,
41′	530	1643	,, ,,

Sind diese Temperaturen die im Ofen herrschenden, so wäre der interessante Schluß zulässig, daß, da die Luft aufwärts strebt, der intensivste Verbrennungsherd bei dieser Anordnung der Düsen bedeutend höher als die Eintrittsöffnung der Düsen liegt. (Siehe Temperaturen von Bohrloch b und c.)

Die Gasgeschwindigkeit.

Auf Grund der gefundenen Werte kann die Gasgeschwindigkeit im Ofen abgeleitet werden. Mit Bezug auf das Verhältnis der Gasmenge zur entsprechenden Luftmenge steht fest: aus einem Molekül O_2 werden bei der Verbrennung mit C entweder zwei Moleküle CO oder ein Molekül CO_2. Aus ersterem Vorgang ergibt sich eine Volumenvermehrung des Gases gegenüber der eintretenden Luft. Daß diese räumliche Zunahme größer ist als die Einbuße durch andere Oxydationsvorgänge (Fe, Si, Mn, P, S), beweist der geringere prozentuale Stickstoffgehalt im Gas. Nach Zahlentafel 9 auf S. 10 enthält das Gas 75,36 % N_2, im Wind befinden sich 79 % N_2. Die absolute Stickstoffmenge ist in beiden dieselbe. Man kann also ableiten:

neben 1 R. T. N_2 befinden sich $\frac{21}{79}$ R. T. O_2 im Wind,

„ 1 R. T. N_2 „ „ $\frac{24{,}64}{75{,}36}$ R. T. andere Gase im Gichtgas.

Aus $1 + \frac{21}{79} = \frac{100}{79}$ R. T. Wind bilden sich:

$$1 + \frac{24{,}64}{75{,}36} = \frac{100}{75{,}36} \text{ R. T. Gas.}$$

Aus 1,0795 m³ Wind entstehen also $\left(\frac{100}{75{,}36} : \frac{100}{79}\right) \cdot 1{,}0795 =$

$$\frac{79}{75{,}36} \cdot 1{,}0795 = \underline{1{,}130 \text{ m}^3 \text{ Gichtgas.}}$$

Um ein ungefähres Bild der Gasgeschwindigkeit zu erhalten, sei angenommen, daß sich aus dem Wind schon in der Düsenzone dieses Gasvolumen bildet (in Wirklichkeit ist dies ja erst der Zustand an der Gicht), und ferner, daß in der Schmelzzone etwa 35 % des Ofenquerschnitts Hohlräume und Kanäle sind, darüber etwa 40 %, nahe an der Gicht etwa 45 %. 1,13 m³ Gas passieren den Ofen in der Sekunde. Es ergibt sich dann die Zusammenstellung in Zahlentafel 24.

Zahlentafel 24.

Ueber der Düse in mm	Ort oder Ofenzone (Bohrloch)	Temperatur an dieser Stelle	Freier Ofen-Querschnitt in m²	Gasvolumen $v_1 = v\,(1 + \alpha\, t)$ i. d. sec.	Resultierende Geschwindigkeit des Gases im Ofen
150	a	1600	0,28	7,74	27,6
460	b	1700	0,28	8,15	29,1
1040	c	1400	0,31	6,91	22,3
1690	d	1175	0,34	6,00	17,6
2340	e	1050	0,35	5,48	15,6
3610	Gicht	700	0,38	4,02	10,6

Die Gase durcheilen, besonders in den unteren Zonen, den Ofen mit großer Geschwindigkeit. (Diese Tatsache bleibt auch dann bestehen, wenn die freien passierbaren Querschnitte in obiger Annahme etwas zu klein sind.)

Rückblick auf die bisherigen Ergebnisse.

Bevor die Versuchsresultate über die flüssigen Erzeugnisse des Ofens mitgeteilt werden, sollen die bisher gefundenen Zahlen über die Wind-, Gas- und Temperaturverhältnisse mit Hinzufügung ergänzender Bemerkungen zusammenhängend beleuchtet werden.

Mit der dem Ofen zugeführten Windmenge ändert sich auch die Menge des erschmolzenen Eisens. Erstere wird am Versuchsofen, wie eingangs erwähnt, durch Drosselklappe geregelt. Liefert der Ofen zu viel Eisen für den augenblicklichen Bedarf, so wird die Klappe geöffnet; die Pressung sinkt; es tritt nun erheblich weniger Wind in den Ofen. Dieser Umstand bewirkt bei einigermaßen beträchtlicher Dauer ein starkes Verengen der Düsenquerschnitte durch sich ansetzende und erstarrende Eisen- und Schlackentropfen. Eine weitere Folge ist unvollkommene Verbrennung: die Gase steigen im Ofen langsamer aufwärts, gebildete Kohlensäure kann leicht reduziert werden.* An der Gicht treten CO_2-ärmere Gase auf, und falls hier die entsprechende Temperatur herrscht, entsteht die Gichtflamme. Der Ofen arbeitet jetzt unökonomisch. Ein Beispiel dafür sind folgende Analysen:

Bei 650 mm Pressung: 16 3 % CO_2 8 8 % Co
„ 300 mm „ : 14,0 % CO_2 10,5 % CO (10 min spät.)

Soll dem Ofen wieder die volle Windmenge zugeführt werden, so ist nunmehr der Eintrittsquerschnitt zu eng, die Spannung steigt ungewöhnlich hoch, aber der Ofen erhält trotzdem weniger Wind als früher (erhöhte Windverluste durch Undichtigkeiten, geringere Lieferungsmengen durch das Gebläse). Die Folgeerscheinungen sind kalter Gang, langsames Schmelzen und matteres Eisen. Die Schlacke ist dann oft so kalt und zäh, daß sie nicht aus dem Vorherd zu bringen ist. Dazu kommt noch, daß der Wind aus den Düsen vorwiegend den leichteren Weg nach unten nimmt, dabei Eisen und Schlacke kalt bläst und das Uebel verstärkt. Es kommt vor, daß der erstarrte Schlackenklumpen vor der Düse sich loslöst, und dann geht der Ofen wieder heiß. Aber die Verbrennung ist auch jetzt nicht ordnungsmäßig: der Wind quetscht sich hinter dem Klumpen an der Wand vorbei aufwärts, die Ofenmitte hat zu wenig Wind, die Schmelzzone rückt stark hinauf, die Gicht ist sehr heiß.

Geht der Ofen bei reicher Füllkoksmenge infolge starken Blasens sehr heiß, so steigert sich seine Temperatur oft so, daß der Wind- oder Gasstrom oxydierte Metallpartikelchen** mitreißt. Das Gichtgas nimmt dann eine rostbraune Färbung an. Diese beobachtete Gichtgasfärbung ist nur wahrnehmbar bei vollem Windeintritt. An der Gicht zeigt sich dann eine Stichflamme, die an der Wand hinaufleckt und entgegen der sonst durchsichtigen Gichtflamme von der geschilderten braunroten Färbung begleitet ist. Sie verschwindet, und mit ihr der Gichtrauch, wenn die durchsichtige Gichtflamme auftritt, die ja stets das Kennzeichen unvollkommener Verbrennung, also weniger heißen Ofengangs ist.

Bemerkenswert ist hier, was Osann bei der Besprechung* des Westschen Buches „Metallurgy of Cast Iron" sagt: „schmilzt man heiß, so hat man geringeren Eisen-, Mangan- und Silizium-Abbrand." Hierzu führt er als Beispiel an: bei einem Stahlwerksofen, der mit 6 bis 8 % Koks betrieben wurde, ging der Mangangehalt von 2 auf 0,8 % zurück, bei 15 % Koks war der Manganverlust fast Null. Es bedeutet hier heiß schmelzen mit reichem Koks-zuschlag schmelzen. Der Borsigsche Ofen schmolz mit gleichbleibendem Kokssatz, aber veränderter Windzufuhr, und bei der Untersuchung der Schlacke bei oben gekennzeichnetem Gang des Ofens mit reicher Windzufuhr ergab sich mehr als der doppelte Gehalt an Eisen (31,20 % Fe) gegenüber normalem Gang (s. unten S. 20). Der braune Rauch wird stets sichtbar, wenn gegen Ende des Blasens die Ofensäule herunterbrennt, also nicht mehr gegichtet wird. In dieser Blaseperiode tritt stets zu viel Wind für die zu verbrennende Koksmenge in den Ofen. Hier würde sich eine Verminderung der Windmenge empfehlen.

Die Windmenge muß dem in der Zeiteinheit verbrennenden Koksgewicht angemessen sein. Ist sie zu schwach, so hat dies unvollkommene Verbrennung, damit Koksvergeudung im Gefolge; ist sie zu groß, so steigt der Verlust durch Abbrand.

Die Windregulierung durch Drosselklappe oder Schieber ist zu verwerfen. Der Ofengang muß, wenn der Wind durch ein Schrauben- oder Kreiskolbengebläse geliefert wird, in gleicher Stärke während der ganzen Schmelzdauer betrieben werden; ein Unterbrechen oder Abschwächen ist zu vermeiden. Bei der Inbetriebsetzung einer Kuppelofenanlage muß die dem Ofen genau angemessene Windmenge geregelt werden und bleibt so bestehen. Nur auf die Weise wird der Schmelzprozeß am meisten ökonomisch gestaltet und ein heißes Eisen erzielt.

Besteht das Bedürfnis, infolge ungleichmäßigen Bedarfs an flüssigem Eisen während einer Schmelzdauer die Schmelzmenge zu beeinflussen, so muß statt eines der obigen Gebläse in Verbindung mit einer Drosselklappe ein Turbinengebläse gewählt werden, wie es sich für andere ähnliche Verwendungszwecke (Kleinkonverter) schon vorzüglich bewährt hat. Dieses fördert stets auf gleichen Druck, gleichviel ob kleine oder große Windmengen angesaugt werden, und diese letzteren kann man in der Saugeleitung durch einen Schieber sehr gut regulieren. Das Gebläse arbeitet dabei immer wirtschaftlich.

Der Verbrennungsvorgang selber ist nun noch etwas näher zu untersuchen. Die bei den Versuchen ermittelten Gasanalysen geben darüber Aufschluß.

Ungefähr die Hälfte des Füllkoks gelangt etwa drei Stunden vor Blasebeginn in den Ofen, befindet sich also nach dieser Zeit in heller Rotglut (etwa 1300 °), der Rest eine halbe Stunde vor Beginn und ist nach dieser halben Stunde auch gut vorgewärmt.

---

* Ledebur, Handbuch der Eisenhüttenkunde 1906, Bd. 1, S. 49.

** Nach Borchers, Hüttenwesen 1908, S. 155 liegt der Siedepunkt des Eisens bei 2600 °. Diese Erscheinung kommt hier nicht in Frage.

* St. u. E. 1907, S. 596 u. f.

Bei Eintritt der Gebläseluft in den Ofen erfolgt ein rascher Uebergang in den Glühzustand innerhalb der ganzen Füllkoksmenge. Damit lassen sich die Linien des Schaubilds 24 erklären (vgl. Zahlentafel 9). Der zu Beginn einsetzende vollkommene Verbrennungsvorgang (Kohlensäurebildung) ändert sich sehr rasch, so daß nach knapp $^3/_4$ Stunden die Verbrennungsgase eine mit Bezug auf CO_2 und CO entgegengesetzte Zusammensetzung haben, wie zu Beginn. Der größte Tiefstand im CO_2-Gehalt war der nach 42 Minuten mit 3,4 % CO_2. Gleichzeitig befinden sich 18,3 % CO im Gase. Um diese Zeit herrschen im Ofen reine Generatoren-Verhältnisse mit stark reduzierender Wirkung. Das letztere ist bemerkenswert auch für spätere Betrachtungen.

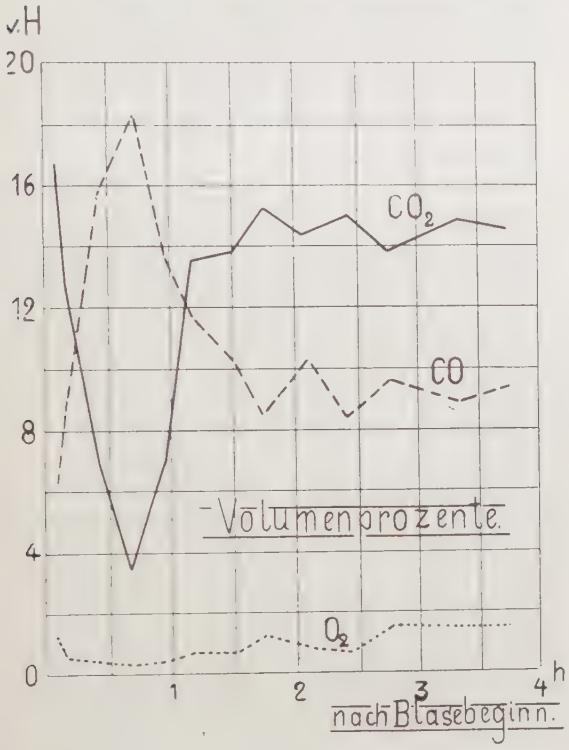

Abb. 24.

Die Zusammensetzung der Gase nimmt nun in ihrer weiteren Veränderung den umgekehrten Weg. Der Füllkoks brennt allmählich auf eine kleinere Menge herab, die Reduktionswirkung der höheren Koksschichten ist geringer geworden wegen ihrer geringeren Mächtigkeit. Das Gas wird wieder reicher an Kohlensäure, und nach zwei Stunden ist ein Beharrungszustand erreicht. Der Füllkoks ist auf ein ziemlich konstant bleibendes Maß, das durch den Satzkoks immer von neuem aufgefüllt wird, herabgesunken, und die Gasverhältnisse ändern sich nur noch unerheblich. Die Zusammensetzung schwankt um eine Gleichgewichtslage herum von etwa 14,5 % CO_2 und 9,3 % CO.

Das Schaubild 25, welches die CO_2-Gehalte der Ofengase in den verschiedenen Zonen graphisch zum Ausdruck bringt, gibt eine Uebersicht über die Verbrennungsvorgänge im Kuppelofen.

Man sieht an dem Linienzug b, daß die Verbrennung des Koks in der Düsenzone ziemlich vollkommen verläuft. Ob sich hierbei nach der Annahme C. W. Meyers* zunächst in statu nascendi Kohlenoxyd bildet, das unmittelbar darauf zu Kohlensäure oxydiert wird, oder ob der vorherrschenden Annahme gemäß sogleich Kohlensäure entsteht, läßt sich bei den schwierigen Verhältnissen im Kuppelofen nicht auf dem Wege des Versuchs feststellen. Für den Effekt** ist es ja auch gleichgültig. Tatsache ist jedenfalls, daß gleich hinterher die reduzierende Wirkung des Koks zur Geltung kommt nach der Gleichung:

$$CO_2 + C = 2\ CO.$$

Was hieraus für Verluste erwachsen, zeigt folgende Ueberlegung: Nach dem Durchschnittswerte der Gichtgasanalysen des Versuchsofens erfolgt die Verbrennung des Kohlenstoffs zu 66,3 % CO_2 und 33,7 % CO. (in Gewichtsteilen).

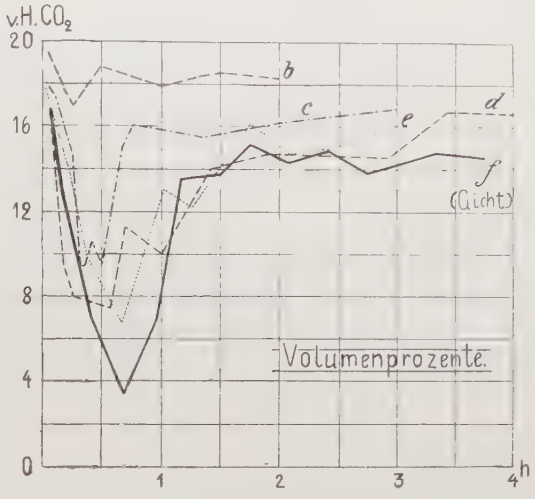

Abb. 25.

In 66,3 G. T. CO_2 sind $66{,}4 \cdot \frac{12}{44} = 18{,}11$ G. T. C

„ 33,7 G. T. CO „ $33{,}7 \cdot \frac{12}{28} = 14{,}44$ G. T. C

In 100 G. T. dieses Gasgemisches ... 32,55 G. T. C.

Es entstehen also aus einem kg C:

$\frac{66{,}3}{32{,}55}$ kg CO_2 mit $\frac{66{,}3 \cdot 12}{32{,}55 \cdot 44} = 0{,}556$ kg C

$\frac{33{,}7}{32{,}55}$ kg CO „ $\frac{33{,}7 \cdot 12}{32{,}55 \cdot 28} = 0{,}444$ kg C.

Die durch diese Verbrennung erzeugte Wärmemenge ist:

$0{,}556 \cdot 8080 = 4495$ WE
$0{,}444 \cdot 2473 = 1097$ WE
5592 WE

Bei vollkommener Verbrennung würden 8080 WE erzeugt, es gehen also für jedes kg Kohlenstoff bei

* Gieß.-Ztg. 1905, S. 433.
** Nernst, Theoret. Chemie 1907, S. 588.

diesem Verbrennungsvorgang 2488 WE verloren, oder mit anderen Worten: die Heizkraft des Brennmaterials wird nur zu 69 % ausgenutzt.

Innerhalb der ersten $^5/_4$ Stunden ist der Ofengang ein unwirtschaftlicher. Dieser Uebelstand läßt sich nicht vermeiden. Ausgeglichen wird er durch eine möglichst lange Dauer der nun folgenden Schmelzperiode. Diese wiederum findet ihre Grenzen in der Zerstörung des Mauerwerks. Diese Erwägungen lenken das Augenmerk auf Oefen mit dünner Wandung und wassergekühltem Mantel. Es ist eine dem Hüttenmann bekannte Erscheinung, daß starke Ofenwandungen unter dem Einfluß der Angriffe von Schmelzprozessen bei hohen Temperaturen sehr rasch auf ein bestimmtes Maß abschmelzen (z. B. beim Martinofen). Theoretisch müßte daher ein gekühlter Ofen mit dünner Wandung weniger Schlacken liefern und dem Betrieb genügen.

Auch die Ergebnisse der Temperaturmessungen lassen sich am übersichtlichsten an Hand eines Schaubilds ablesen. Durch die graphische Zu-

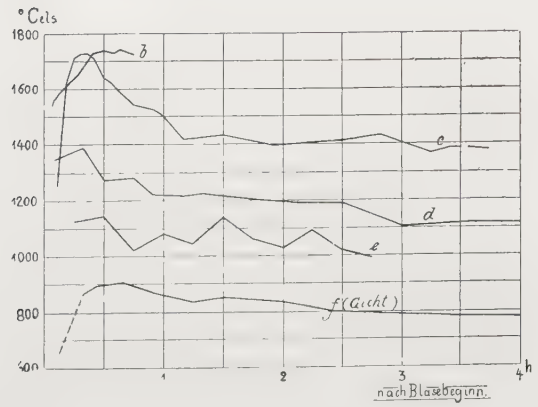

Abb. 26.

sammenstellung der in den Zahlentafeln angeführten Temperaturen entsteht das Schaubild Nr. 26. Im ersten Teil der Schmelzperiode liegt Bohrloch d innerhalb der Schmelzzone (ein Umstand, der auf die anfänglich bis hierher reichende Füllkokshöhe zurückzuführen ist), das nächst tiefere Bohrloch c dauernd, wie sich auch an den stark verschlackten Wänden in diesem Teil des Ofens feststellen läßt. Ein langsames Abfallen der Temperatur während der ganzen Schmelzdauer läßt den Schluß zu, daß die Füllkoksmenge, die bis hierher reicht, in ihrem Volumen allmählich zurückgeht.

Ein Temperaturabfall ist auch in den höheren Ofenzonen feststellbar (s. im Schaubild 26 die Linienzüge d, e, f). In der ersten Stunde spielt dabei die Füllkokswirkung mit. Dann aber schmelzt der Ofen rascher, und der Temperaturabfall darf der schnelleren Abwärtswanderung der Schmelzsäule zugeschrieben werden. Der Ofen arbeitet immer wirtschaftlicher. Trotzdem bleibt dauernd an der Gicht ein großer Wärmeverlust.

Die Schmelzzone erreicht das große Maß von etwa 1 m über der Düsenoberkante. Der Wind dringt nicht vor den Düsen bis in die Ofenmitte, sondern streicht, aufwärtsstrebend, erst allmählich bis in die Mitte vor. Die Schmelzzone wird dadurch sehr in die Höhe gezogen. Unterstützend wirkt in diesem Sinne die höher gelegene vordere Düse. Die Höchsttemperatur liegt nicht unmittelbar in der Düsenzone, sondern darüber.

Welche Schlüsse lassen sich aus den Ergebnissen für die Theorie des Ofenbaues ziehen?

In vorliegendem Fall liegen die Verhältnisse folgendermaßen: Vor den Düsen muß naturgemäß Koks liegen, desgleichen bis zur Höhe von etwa einem halben Meter darüber. Festes Eisen darf bis dahin ($^1/_2$ m über Düsenoberkante) nicht wesentlich tiefer kommen, weil sich oberhalb der Düse die Koksverbrennung vollziehen, die Ofentemperatur erzeugt werden muß. Die Verbrennung des Koks erfolgt nun, wie die Versuche lehrten, so, daß sich unter dem Einfluß des Luftübergewichts Kohlensäure bildet. Diese wird von den nächst höher gelagerten Koksschichten bei der hohen Temperatur zum Teil zu Kohlenoxyd reduziert. Diese Reduktion ist nur auf ein Mindestmaß zu beschränken möglich, in keinem Ofen aber ganz zu umgehen. Führt man nun nach eben vollzogener Reduktion durch eine zweite höher gelegene Düsenreihe von neuem Luft zu, so erreicht man eine teilweise Verbrennung des Kohlenoxyds zu CO_2. Es werden jedoch für jedes kg verbrannten Kohlenoxyds 2400 WE frei, also wird hier von neuem die Temperatur durch diesen zweiten Verbrennungsherd gesteigert. Die höher benachbarten Teile der Beschickungssäule erfahren eine Temperatur-Erhöhung. Es vollzieht sich darin, da es zunächst noch vorwiegend Koks ist, eine erneute Reduktion. Und selbst wenn der Füllkoks knapp über diesen höher gelagerten Düsen enden sollte, so darf man doch nicht vergessen, daß im Kuppelofen das Abwärtssinken der Beschickung nicht in idealer Schichtenlagerung erfolgt, sondern daß anamentlich in diesen unteren Zonen — das spezifisch schwerere Eisen sucht ja beim Abwärtswandern vorzueilen — eine völlige Vermengung der Beschickungsbestandteile eingetreten, also zur Reduktion genügend glühender Koks vorhanden ist.

Der einzige, aber fragwürdige Erfolg ist nur eine Steigerung der Schmelzzonenhöhe. Deren Schattenseiten sind bekannt (Si-, Mn-, Fe-Verbrennung, S-Aufnahme).

Die Düsenanlage erscheint am zweckentsprechendsten, wenn eine Düsenreihe von geringer Höhenausdehnung vorgesehen wird, deren einzelne Düsen eine solche Neigung nach unten haben, daß der Wind beim Vordringen in die Beschickung in einem Bogen die Ofenmitte schon in Düsenhöhe erreicht. Dieser Idealzustand wird ja durch die Verschlackung stark beeinträchtigt, aber die Praxis hat gelehrt, daß hier die Verbrennung sehr vollkommen erfolgt und die Schmelzzonenhöhe auf ihr Mindestmaß beschränkt wird.

Die flüssigen Erzeugnisse des Ofens.

Zum Ausbessern der verschlackten Ofenwände nach jeder Schmelzung dient eine Schamottemasse der Zusammensetzung: 74,46 % SiO_2, 23,59 % Al_2O_3, 1,24 % FeO, 0,47 % CaO, 0,3 % MgO. Im ganzen erfordert die Ausbesserung des Ofens 180 kg dieser Masse (trockenes Gewicht).

Der Ofen schmelzt meist ohne Kalk im Füllkoks. Da dies als ungünstig angesehen werden muß, wurde für die folgenden Probenahmen die Beschickung mit 110 kg Kalkstein im Füllkoks gewählt. Die Analysen der beiden letzteren sind:

Koks: 89,01 % C, 1,11 % S, 1,47 % Fe_2O_3, 0,96 % Al_2O_3, 1,38 % MgO + CaO, 0,0012 % P, 3,29 % SiO_2, 2,78 % H_2O.

Kalkstein: 51,59 % CaO, 1,62 % FeO, 1,24 % MgO, 2,96 % SiO_2, 39,25 % CO_2.

Die Beschickung am Versuchstage war diese:

	Füllkoksgew. .	600 kg	
	Kalkstein . .	110 „	
42,5 Sätze:	600 kg Eisen .	25 500 „	
	+ 42 kg Koks . .	1 785 „ = 7,00 %	v. Eisen gew.
	+ 10 kg Kalkst. .	425 „ = 1,67 %	

Die Gattierung bestand aus:

v. H.			Si	Mn	P	S
15	Konkordia	mit	2,65	0,88	0,64	0,031
10	Hämatit Krupp .	„	3,10	1,07	0,066	0,016
10	Schalker hochsiliz.	„	4,00	1,08	0,09	0,028
15	Mathildenhütte . .	„	2,04	0,64	1,23	0,018
10	Luxemburg . . .	„	2,20	0,62	1,63	0,036
10	Gußspänebriketts*	„	2,00	0,50	0,45	0,140
30	Maschinenbruch .	„	2,30	0,60	0,60	0,10

* Hergestellt ohne Bindemittel nach den Verfahren Ronay (Hochdruckbrikettierung G. m. b. H. Berlin).

Der C-Gehalt der Gattierung wurde aus einer Durchschnittsprobe zu 3,30 % bestimmt. Es resultiert eine Durchschnittsanalyse:

3,30 % C	0,68 % P
2,52 % Si	0,059 % S
0,72 % Mn	

Neben dem flüssigen Eisen erzeugte der Ofen 1330 kg Schlacke = 5,22 % des Eisengewichts; am Ende, beim Entleeren des Ofens, enthielt er noch 120 kg Koks.

Dem Ofen wurden während der ganzen Schmelzdauer, die vier Stunden währte, in Zeitabschnitten von 15 bis 20 Minuten Eisenproben, und von etwa 40 Minuten Schlackenproben entnommen. Dazu diente ein langstieliger schmaler Löffel aus Schmiedeisen, der mit Lehm und Graphit ausgeschmiert war. Durch das vordere Schauloch am Vorherd konnte man mit demselben zum Ablaufkanal zwischen Ofen und Vorherd reichen und dort die Proben abfangen. Natürlich mußte der Wind so lange abgestellt werden. Auf diese Weise wurde stets das Material gewonnen, wie es der Ofen in dem Moment erzeugte. In der Zahlentafel erhalten diese Proben das Kennwort „Ablaufkanal"; bei den Proben, die Abstichen entnommen wurden, steht das Wort „Abstich".

Siehe Zahlentafel 27 und 28.

Das ungewöhnlich starke Ansteigen der Pressung rührt von dem häufigen Abstellen des Windes her, wodurch der Bildung der Schlackenklumpen vor den Düsen sehr Vorschub geleistet und der Weg für den Wind verengt wurde.

Die Zusammenstellung gibt eine Uebersicht über die Veränderung der Zusammensetzung der Ofenerzeugnisse. Durch die Schaubilder 29 und 30, welche folgen, wird der Vorgang des Schmelzens mit seinen Einflüssen klar veranschaulicht.

Wegen der innigen wechselseitigen Beziehungen und der Einwirkungen von flüssigem Eisen und flüssiger Schlacke aufeinander müssen diese beiden Komponenten des flüssigen Ofeninhalts nebeneinander betrachtet werden.

In der Zusammensetzung des Eisens erleiden die stärksten Veränderungen im Verlauf des Schmelzens Silizium, Schwefel und Kohlenstoff.

Zahlentafel 27. Eisenproben.

Nr.	Zeit nach Blasebeginn	Windpressung in mm WS	Bezeichnung	C	Si	Mn	P	S
1	20′	390	Ablaufkanal	3,50	1,82	0,68	0,626	0,164
2	35′	480	„	3,55	1,97	0,67	0,626	0,146
3	1h 00′	590	1. Abstich. Anfang	3,38	2,01	0,56	0,630	0,116
4	1h 00′	590	1. Abstich. Ende	3,36	1,99	0,51	0,665	0,114
5	1h 15′	590	Ablaufkanal	3,36	2,18	0,61	0,708	0,112
6	1h 30′	590	2. Abstich. Anfang	3,31	1,98	0,54	0,690	0,104
7	1h 30′	590	2, Abstich. Mitte	3,39	2,07	0,53	0,656	0,094
8	1h 30′	590	2. Abstich. Ende	3,36	2,13	0,57	0,686	0,104
9	1h 55′	640	3. Abstich	3,36	2,22	0,61	0,673	0,104
10	2h 00′	645	Ablaufkanal	3,33	2,31	0,61	0,646	0,116
11	2h 25′	720	Abstich	3,38	2,16	0,58	0,690	0,112
12	2h 35′	700	Ablaufkanal	3,36	2,27	0,62	0,693	0,088
13	3h 00′	765	Abstich	3,32	2,25	0,58	0,698	0,112
14	3h 15′	780	Ablaufkanal	3,33	2,39	0,61	0,682	0,102
15	3h 20′	790	Abstich	3,31	2,29	0,59	0,617	0,116
16	3h 45′	820	Ablaufkanla	3,29	2,44	0,63	0,682	0,116
17	3h 50′	820	Abstich	3,31	2,25	0,59	0,700	0,118
18	4h 00′	0	Ablaufkanal. Letzte Eisentropfen.	3,08	2,40	0,58	0,715	0,124
			Mittelwerte =	3,35	2,17	0,59	0,672	0,115

3h 10′ = letzte Gicht.

Zahlentafel 28. Schlackenproben.

Nr.	Zeit nach Blasebeginn	Windspannung mm WS	Bezeichnung	Aussehen	SiO_2	FeO	Al_2O_3	CaO	MgO	MnO	P_2O_5	S
1	35′	480	Ablaufkanal	schwarzgrünlich	43,32	11,09	12,30	28,52	1,42	3,32	0,087	0,297
2	1h 15′	590	,,	schwarzbräunlich	45,37	24,50	13,25	12,36	0,66	3,37	0,362	0,271
3	2h 00′	645	,,	,,	47,00	23,72	11,47	13,61	0,73	3,73	0,433	0,258
4	2h 35′	700	,,	,,	48,21	21,35	11,68	14,76	0,78	3,52	0,346	0,248
4 a	2h 45′	720	Abstich	schwarzbraun-grünl.	47,51	20,39	12,04	15,41	0,71	3,32	0,374	0,249
5	3h 15′	780	Ablaufkanal	schwarzbräunlich	51,18	18,35	11,05	15,23	0,71	3,59	0,333	0,234
6	3h 45′	820	,,	,,	50,66	17,59	12,76	16,10	0,80	3,16	0,311	0,217
7	4h 00′	0	,,	schwarzbraun-grünl.	62,35	15,45	8,11	10,61	0,70	2,91	0,229	0,241
Mittelwert aus den Schlackenproben vom Ablaufkanal ohne 4 a:												
—	—	—	Ablaufkanal	—	47,62	19,43	12,09	16,76	0,85	3,45	0,312	0,254

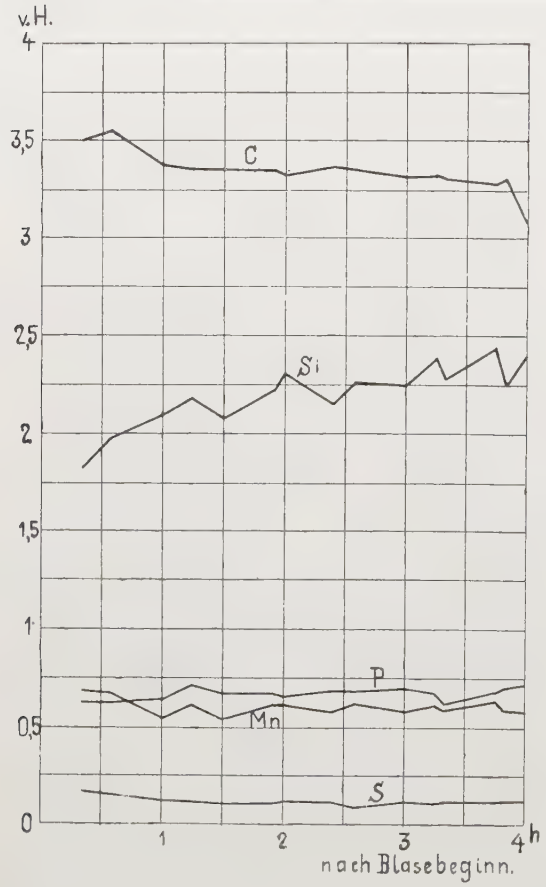

Abb. 29.

und scheint nur am Ende beim Herunterschmelzen der Ofensäule eine kleine Einbuße zu erleiden. In letzterem Falle ist die Atmosphäre im Ofen stark oxydierend, in der ersten Stunde des Schmelzens dagegen, wie aus den früheren Analysen hervorging, reduzierend. Man kann dem Eisen beim Schmelzen im Kuppelofen keinen willkürlichen Kohlenstoffgehalt (2,5 bis 2,7 % C werden für möglichst günstige Festigkeitseigenschaften für das Anstrebenswerte

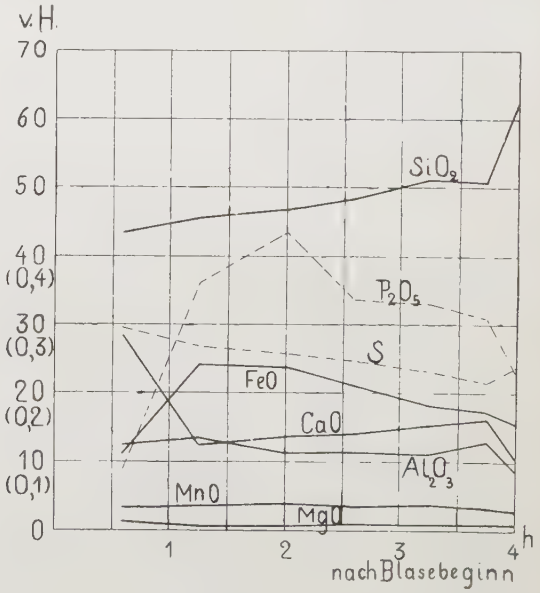

Abb. 30.

Ein Blick auf den Verlauf der C-Linie des Schaubilds 29 läßt erkennen, daß der Kohlenstoffgehalt des Schmelzgutes zu Beginn des Blasens eine geringe Anreicherung erfährt, die auf die große Menge Füllkoks, die das herabtropfende Eisen zu passieren hat, zurückzuführen ist. Er bleibt dann für den weiteren Verlauf des Schmelzens, etwa von der ersten Stunde ab, auf der gleichen Höhe stehen

gehalten*) geben, da je nach dem Reichtum an Kohlenstoff entweder Aufnahme von C aus dem Koks, oder Verlust durch Verbrennen erfolgt.** Dieser mittlere Kohlenstoffgehalt ist hier ungefähr 3,35 % C.

* Gieß.-Ztg. 1907, S. 70.

** Ledebur, Handbuch der Eisenhüttenkunde, 5. Aufl., Bd. 2, S. 324.

Der Siliziumgehalt des erfolgenden Eisens weist für die ganze Schmelzdauer eine allmähliche Zunahme auf. Ein Blick auf das nebenstehende Schaubild 30 ergibt den Zusammenhang zwischen dieser Tatsache und der Schlackenzusammensetzung. In der ersten Stunde ist der Siliziumabbrand am größten, der anwesende Kalk aus dem Füllkoks veranlaßt etwa 37 % des Si zu verschlacken. Ist dann aber die Wirkung des Kalkgehalts der Schlacke nicht mehr in dem Maße vorhanden (da diese Schlacke nach dem Vorherd abgeflossen ist), so zeigt sich eine Zunahme des Siliziumgehalts im Eisen. Die Schlacke wird durch die Aufnahme des Ofenfutters immer kieselsäurereicher. In demselben Maße bleibt das Silizium des Eisens vor der Oxydation bewahrt, am Ende des Schmelzens gehen nur noch 7 % vom Siliziumgehalt in die Schlacke. Der mittlere Abbrand vom Silizium ist 14 %.

Auf den Mangangehalt des Eisens scheint der Kalk im Füllkoks in umgekehrtem Sinne einzuwirken. Im Anfang schützt der Kalk als Base das Mangan vor der Oxydation. Dazu kommt dann die reduzierende Wirkung der Ofengase, wie sie in dieser Schmelzperiode früher beobachtet wurde. Sie ist in diesem Zeitpunkt ein Hauptgrund der geringeren Oxydation des Mangans, im Gegensatz zum Silizium, dessen chemische Verwandtschaft zum Kalzium-Oxyd veranlaßt, daß es zum Teil verschlackt. In den ersten $^3/_4$ Stunden ist darum ein geringer Abbrand von 3,5 % des Mangans feststellbar, dann aber mit abnehmendem Kalkgehalt in der Schlacke und steigendem Kohlensäuregehalt der Gase verbrennt mehr Mangan. Im weiteren Verlauf des Schmelzens beobachtet man einen Verlust von durchschnittlich 22 % Mangan. Es wird weiter unten das Verhalten des Mangans beim Fehlen des Kalks im Füllkoks vergleichend betrachtet. Es ergibt sich dann ein etwas höherer Abbrand. Der Mangangehalt der Schlacke ist ziemlich gleichbleibend.

Ueber den Verlust an Eisen beim Kuppelofenschmelzen gibt das Schaubild der Schlackenzusammensetzung 30 Aufschluß. Aus dem Zug der FeO-Linie geht hervor, daß die Verhältnisse hier ähnlich liegen wie im voraufgehenden Fall beim Mangan. Im Anfang, in der reduzierenden Atmosphäre, ist der Verlust des Fe durch Oxydation gering. Mit dem Verschwinden des hohen Kalkgehalts in der Schlacke und bei den immer CO_2-reicheren Gasen nimmt der Abbrand zu, um nach $^5/_4$ Stunden im weiteren Verlauf des Schmelzens allmählich wieder zurückzugehen. Dieser letztere Umstand hat seinen Grund (weil die Verhältnisse im Ofen sich dann nur wenig ändern) wohl darin, daß die Füllkokshöhe zurückgeht, das Eisen nicht so früh schmilzt und die Tropfhöhe abnimmt. Gerade in letzterer vollzieht sich ja die starke Oxydation, infolge der innigen Berührung von flüssigem Eisen und den eine Oxydationswirkung ausübenden Gasen. Da die gesamte Schlackenmenge 1330 kg beträgt mit durchschnittlich 20,39 % FeO = 15,85 % Fe, so sind das im ganzen 210,81 kg Fe.

Von diesen 210,81 kg Fe sind abzuziehen:

23,3 kg Fe aus dem Koks
6,7 „ „ „ „ Kalkstein
30,0 kg Fe.

Es sind also oxydiert zu FeO 180,81 kg Fe. Das ergibt einen mittleren Eisenabbrand von 0,71 % Fe.

Der Phosphorgehalt des Eisens ändert sich wenig. Zwischen den beiden Komponenten des Schmelzerzeugnisses, Eisen und Schlacke, besteht ein gewisess Lösungsverhältnis (Teilungsfaktor oder Teilungskoeffizient von Jüptner genannt*) für Phosphor. Ist die Schlacke ohne Phosphorgehalt, so verbrennt ein Teil des Phosphors im Eisen. Ist das Eisen gegenüber einem hohen Phosphorgehalt der Schlacke noch nicht mit P gesättigt, so nimmt es Phosphor aus der Schlacke auf. Dieser Fall wird später noch näher gekennzeichnet. Im vorliegenden Schmelzgang muß sich die P-arme Schlacke zunächst mit P_2O_5 sättigen, darum im Anfang ein Phosphorabbrand von etwa 3 %. Im späteren Verlauf des Schmelzens deckt ein geringer Abbrand von P den P_2O_5-Gehalt der Schlacke. Die P_2O_5-Linie zeigt von der zweiten Stunde ab ein langsames Fallen. Das ist wohl auch auf die geringere Tropfhöhe und rascheres Schmelzen zurückzuführen. Wenn der Phosphorgehalt des geschmolzenen Eisens einige Hundertstel mehr aufweist, als das Eisen der Gattierung, so liegt dies an dem Verlust des Eisengewichts durch den Abbrand der übrigen Elemente.

Die Schwefelaufnahme des Eisens aus dem Koks läßt sich durch Kalkzuschlag verringern. Jedoch ist die große Schwefelmenge aus dem Füllkoks stets von Einfluß, trotz des Kalksteins. Die Frage der Entschwefelung wird am Schluß dieses Aufsatzes noch einmal behandelt. Im vorliegenden Fall ist im Anfang eine große Schwefelanreicherung von 160 % feststellbar, die aber nach der ersten Stunde schon auf 96 % zurückgegangen ist und immer mehr fällt. Am Ende der Schmelzperiode ist sie wieder etwas größer. Die mittlere Schwefelaufnahme liegt bei 95 %. Die Aufnahmefähigkeit der kalkreichen Schlacke für Schwefel ist eine beschränkte (nach Wüst** liegt sie zwischen 0,20 und 0,25 % S), mit steigendem Säuregehalt wird sie geringer. Da die Schlacke kieselsäurereicher wird, so geht der Schwefelgehalt immer mehr zurück. Der Schwefelgehalt der Abstichschlacke ist 0,249 %.

Eisen, Silizium und Mangan tragen bei zum Abbrand, Schwefel und Kohlenstoff verringern ihn. Der Gesamtabbrand der Eisengattierung ergibt sich demnach zu:

0,71 Fe	= 0,71 %	des	geschmolzenen	Eisens
2,52 — 2,17 Si	= 0,35 %	„	„	„
0,72 — 0,59 Mn	= 0,13 %	„	„	„
	1,19 % = Verlust			
3,35 — 3,30 C	= 0,05 %	des	geschmolzenen	Eisens,
0,115 — 0,059 S	= 0,056 %	„	„	„
	0,106 % = Aufnahme			

* Jüptner, Grundzüge der Siderologie 1904, Bd. 3, S. 122.

** Mitt. d. Eisenh. Inst. d. Techn. Hochschule Aachen, 1. Bd. 1906, S. 24.

Der Gesamtabbrand ist also 1,19—0,106 = 1,084 %. (Bei einer anderen Bestimmung ergab sich 1,06 %.)

Die Schlacke setzt sich zusammen aus:

161	kg	Koksasche	= 12,1 %
454,5	„	Abbrand	= 34,1 %
310	„	Kalk (feste Rückstände)	= 23,3 %
180	„	Ausschmiermasse	= 13,5 %
225,5	„	Sand (Restbetrag)	= 17,0 %
1330,0	kg		100,0 %

Ueber die wechselnde Menge der fallenden Schlacke lassen sich folgende Schlüsse ziehen: Im Schaubild 30 sieht man die SiO_2-Linie ständig aufsteigen; der Kieselsäuregehalt der Schlacke nimmt immer mehr zu. Diese Beobachtung könnte zunächst zu der Annahme verleiten, daß das Ofenmauerwerk in immer stärkerem Maße verschlackt. Ein Blick auf die CaO-Linie zeigt aber, daß dieser Schluß nicht berechtigt ist. Die Schlacke wird immer kalkreicher, d. h. aber, die Schlackenmenge, welche während des Schmelzens erzeugt wird, wird immer geringer, denn der Kalkzuschlag ist konstant. In der Tat verschwindet die Ausschmiermasse des Ofenfutters unter dem Einfluß der mechanischen Angriffe durch die heruntersinkende Ofensäule und der Hitze vorwiegend innerhalb der ersten zwei bis zweieinhalb Stunden. Man erkennt dies an den ungelösten großen Bruchstücken dieser Masse, welche die Schlacke dann führt (besonders Schlackenprobe 2 bis 4). Das feste Mauerwerk (worin u. a.: 84,92 % SiO_2, 11,74 % Al_2O_3, 3,51 % Fe_2O_3) setzt dem mechanischen, wie dem Angriffe durch die Hitze und die chemischen Einflüsse einen größeren Widerstand entgegen wegen seiner bedeutenderen Festigkeit und Dichte. Dazu kommt ferner, daß bei geringerer Ofenwandstärke die Neigung zum Verschlacken wegen der besseren Wärmetransmission geringer wird (s. auch S. 18).

Am Schluß des Blasens, wenn die heiße Temperatur beim Zusammensinken der herunterbrennenden Beschickungssäule auch das obere Ofenmauerwerk erreicht (es wurde z. B. 15 Minuten vor dem Abstellen des Windes, also zu einer Zeit, da die Säule bis über die Mitte heruntergebrannt war und sich große weißgelbe Flammen bis zur Gicht hinauf bildeten, an der Gicht die Temperatur von 1400 ° C gemessen), ist ein sehr starkes Wachsen des SiO_2-Gehalts der Schlacken wahrzunehmen. Dieser Zuwachs ist dem Abschmelzen der oberen Ofenwandungen zuzuschreiben.

Die Gesamtschlackenmenge ist darum abhängig von der Durchwärmung des Mauerwerks, also der Menge des geschmolzenen Eisens und der Schnelligkeit des Schmelzens (ob viel oder wenig Wind). Natürlich daneben auch von der Menge der Koksasche, des am Eisen haftenden Sandes, des Abbrandes und der Kalkmenge. Bei einem Kalkzuschlag von 110 kg im Füllkoks und 10 kg in jedem Satz ergab sich eine Schlackenmenge von 5,22 % des Eisengewichts. In anderen Fällen, beim Fehlen des Kalks im Füllkoks, war das Gewicht der Schlacke wie folgt:

Menge des geschmolzenen Eisens	Menge der gefallenen Schlacke	
kg	kg	% d. Eisengewichts
24 300	1217	5,01
26 100	1320	5,06
15 600	676	4,10

Der höhere Prozentsatz bei größeren Eisenmengen rührt davon her, daß in diesen Fällen rasch und heiß, d. h. mit viel Wind geschmolzen wird. Die Schlackenmenge beträgt bei 25 t geschmolzenen Eisens in der Regel 5 %.

Zum Vergleich mit den vorstehenden Untersuchungen sei hier das Schmelzen ohne Kalkstein im Füllkoks angeführt (s. Zahlentafel 31).

Zahlentafel 31.

Nr.	Bezeichnung	Zeit nach Blasebeginn	Si	Mn	P	S
1	Ablaufkanal	15′	1,98	0,57	0,395	0,204
2	„	18′	2,21	0,57	0,417	0,193
3	„	23′	2,48	0,87	0,427	0,172
4	„	30′	2,49	0,80	0,550	0,110
5	Erster Abstich 600 kg	42′	2,40	0,56	0,410	0,176
6	Proben 5—8	42′	2,25	0,68	0,415	0,135
7	nacheinander	42′	2,43	0,73	0,501	0,121
8	entnommen	42′	2,23	0,56	0,380	0,137
9	Ablaufkanal	45′	2,53	0,71	0,507	0,085
10	Zweiter Abstich	53′	2,48	0,625	0,496	0,101

Die Gattierung hat folgende Durchschnittsanalyse:

2,46 % Si	0,62 % P.
0,85 % Mn	0,037 % S.

Die Proben führen die Bezeichnung wie früher. Die erste Probe fällt weiß. Charakteristisch ist bei diesen Proben die starke Schwefelaufnahme und der Manganabbrand im Anfang. Der Siliziumgehalt steigt rascher auf eine normale Höhe. Bemerkenswert ist auch der Mangangehalt in der Probe 3 und 4. Es ist der hohe Gehalt auf eine Unhomogenität des abfließenden Eisens zurückzuführen; denn das Eisen fließt vorläufig noch in schwachem Strom ab, und der Mangangehalt der verschiedenen Eisensorten der Gattierung schwankte zwischen 1,18 und 0,62 % Mangan. Mit dem im Anfang ebenfalls stark schwankenden Phosphorgehalt verhält es sich ähnlich.

Diese Ungleichartigkeiten soll der Vorherd ausgleichen. Wie unvollkommen dies im Anfang erfolgt, besagen die Analysen der Proben 5 bis 8 vom ersten Abstich. Die größten Abweichungen von den Mittelwerten des ersten Abstichs sind 4,3 % des Siliziums, 15,9 % des Mangans, 19,7 % des Phosphors und 24,0 % des Schwefelgehaltes. In diesem Falle ist die Mischereigenschaft des Vorherdes nicht bemerkbar. Das geringe Eisengewicht trägt daran einen Teil der Schuld; es bleibt nicht dünnflüssig genug, um sich genügend zu mischen. Etwas besser ist dies, wenn der Vorherd durch aufgenommenes Eisen schon gut vorgewärmt ist, oder wenn der Abstich erst erfolgt, wenn sich viel Eisen angesammelt hat. Dafür diene Zahlentafel 32 als Beispiel.

Zahlentafel 32.

Nr.	Si	Mn	P	S
1	1,92	0,56	0,439	0,157
2	1,85	0,55	0,422	0,169
3	1,87	0,63	0,468	0,169
4	1,86	0,65	0,488	0,169
5	1,88	0,56	0,463	0,164
6	1,88	0,58	0,474	0,161
7	1,86	0,59	0,488	0,158
8	1,89	0,58	0,463	0,158
9	1,86	0,59	0,494	0,156
10	1,87	0,57	0,494	0,157
11	1,88	0,61	0,460	0,160
12	1,88	0,57	0,439	0,159
13	1,92	0,57	0,456	0,150
14	1,93	0,58	0,432	0,147
15	1,93	0,57	0,447	0,157
16	2,01	0,58	0,444	0,151
17	2,03	0,61	0,426	0,144

warme Wasser schwach zufließt, keine große Neigung hat, sich ohne Unterstützung durch Umrühren innig miteinander zu vermischen.

Eine ähnliche Erfahrung macht ja der Gießereimann häufig beim Guß aus großen Pfannen. Wenn man dieses Eisen etwas lange abstehen läßt, so ist es nicht selten, daß sich am Boden ein viel matteres Eisen abweichender Zusammensetzung abgesetzt hat.

Metallographische Untersuchung.

Zur metallographischen Untersuchung sind die Proben Nr. 1 der Zahlentafeln 27 und 31 herangezogen und ihre Lichtbilder gegenübergestellt worden.

Beide Proben sind unter gleichen Bedingungen erstarrt. Lichtbild 33 zeigt das normale Gefüge nicht zu langsam erkalteten grauen Roheisens.* Man erkennt bei der 200fachen Vergrößerung die

× 200.

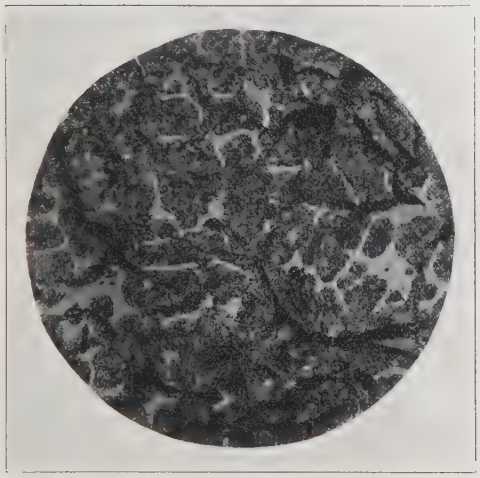

Abb. 33.

× 35.

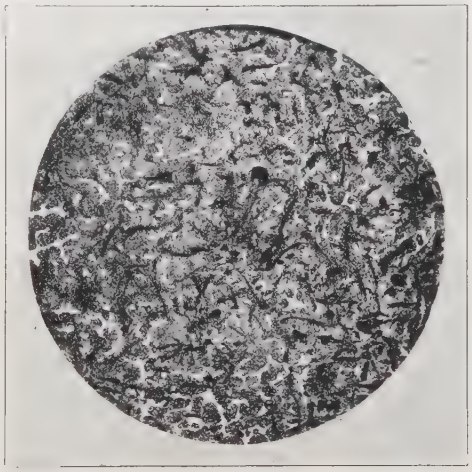

Abb. 34.

Die Werte darin entsprechen den nacheinander entnommenen Proben eines ersten Abstiches von 5000 kg (sog. Zylinder-Eisen). Der Vorherd war damit ungefähr an der Grenze seiner Aufnahmefähigkeit angelangt, also gut erhitzt. Der Abstich erfolgte etwa eine Stunde nach dem Blasebeginn. Die größte prozentuale Schwankung vom Mittelwert ist hier 5,8 % des Schwefels; die Abweichungen sind also nicht so groß wie vorher. Aus beiden Beispielen geht aber hervor, daß die Eigenschaft des Vorherdes als Mischer zu wünschen übrig läßt. Für kleine Abstiche ist seine ausgleichende Wirkung unbedeutend; bei Oefen für Kleinguß, wo häufig abgestochen werden muß, ist der Vorherd darum ein Luxus. Bei großen Abstichen und schwerem Maschinenguß ist die Mischung in der Pfanne mindestens ebenso wirksam. Man sollte nicht vergessen, daß das Eisen, welches vom Ablaufkanal in dünnem Strahl in den Vorherd heruntergleitet, ähnlich wie eine Mischung heißen und kalten Wassers in einer Wanne, in die das

Gefügebestandteile Graphit (schwarz), Zementit weiß) und Perlit (grau). Dasselbe Material in schwächerer Vergrößerung zeigt Lichtbild 34.

Im Gegensatz hierzu sind im Lichtbild 35 die typischen Bestandteile weißen Roheisens erkennbar: Zementit (weiß) und Perlit (grau). Graphit fehlt. Da die chemische Zusammensetzung hier (Probe 1, Tafel 31) mit Ausnahme des Schwefels und Phosphors nicht sehr von Probe 1 in Tafel 27 abweicht, der Phosphor aber bei der vorliegenden Konzentration das Gefüge nicht wesentlich beeinflußt, so erkennt man in dem Schwefel die Ursache des Weißwerdens.

Steigt der Schwefel noch höher, wie z. B. bei einer Probe mit 0,33 % S, so seigert das Sulfid aus und sammelt sich, auch bei kleineren Stücken, in der Mitte des Gußstückes an und trägt dabei das

* Siehe auch Heyn und Bauer, Metallographie 1909, Teil 2, S. 110 u. f.

Aussehen einer stark porösen Masse von der Färbung des Schwefelkieses.* Leider gelang es wegen der großen Sprödigkeit dieses Seigerungsproduktes trotz großer Sorgfalt nicht, einen Schliff herzustellen. Dieser Teil bröckelte (schon bei Schmirgelscheibe I mittel) aus. Die photographische Wiedergabe dieses Schliffes im Lichtbild 36 zeigt darum nur die hier schwarz erscheinenden Vertiefungen, welche vom herausgerissenen Material herrühren.

Stoff- und Wärmehaushalt des Kuppelofens.

Im Anschluß an das im Voraufgehenden Gefundene soll jetzt die stoffliche Einnahme und Ausgabe des Ofens und daran anschließend sein Wärmehaushalt festgelegt werden. Zugrunde liegt hierbei die vierstündige Schmelzzeit beim Versuch von Seite 19, dessen Ergebnis in den Zahlentafeln 27 und 28 mitgeteilt ist.

In der Sekunde wird bis vor den Ofen durchschnittlich eine Windmenge von 1,28 m³ gefördert, in vier Stunden also 4 . 3600 . 1,28 . 1,293 = 23 832,6 kg Wind. Für die ganze Blasedauer ist der mittlere Verlust 18,5 %, entsprechend 4409,0 kg; es resultiert also eine nutzbare Windmenge von 19 423,6 kg, worin, bei der Zugrundelegung von 76,8 % Stickstoff und 23,2 % Sauerstoff, enthalten sind:

14 917,2 kg N_2
4 506,4 „ O_2 — 19 423,6 kg

Der Wind führt bei 18 ° Außentemperatur eine Feuchtigkeitsmenge von 15,5 g im m³ mit sich, im ganzen also:

$$0{,}0155 \cdot 19\,423{,}6 \cdot \frac{1}{1{,}293} = 232{,}8 \text{ kg } H_2O \quad 232{,}8 \text{ kg.}$$

Zur Einnahme ist ferner die Ausschmiermasse des Ofenmauerwerks zu zählen. Ihr Gewicht ist:

180,0 kg.

× 200.

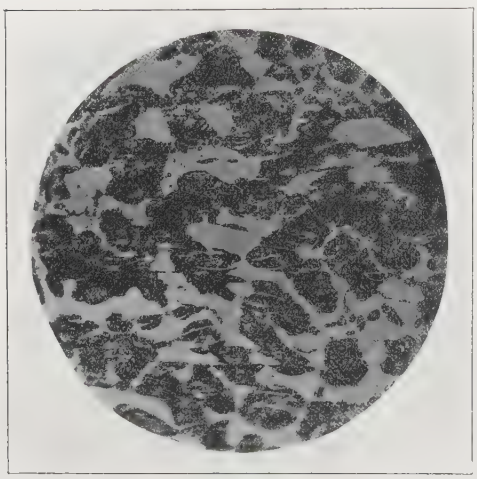

Abb. 35.

× 200.

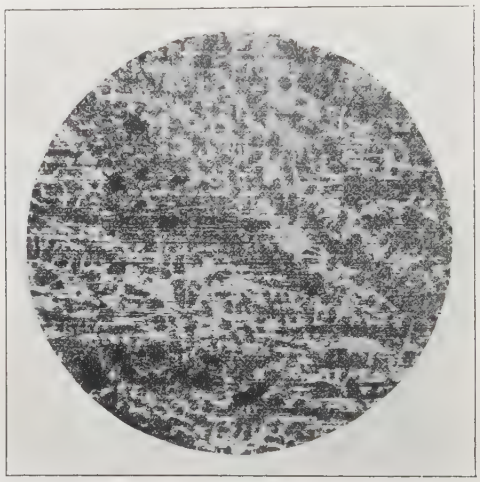

Abb. 36.

Stofflicher Haushalt.

Einnahme:

25 500 kg Eisen, enthaltend:

23 633,4	kg	Fe
841,5	„	C
642,6	„	Si
183,6	„	Mn
173,4	„	P
25,5	„	S — 25 500 kg

2265 kg Koks, worin:

2 016,1	kg	C
25,1	„	S
160,8	„	SiO_2 und Basen
63,0	„	H_2O — 2 265 kg

535 kg Kalkstein aus Rüdersdorf mit:

276,0	kg	CaO
17,9	„	anderen Basen
15,9	„	SiO_2
210,0	„	CO_2
15,2	„	H_2O — 535 kg

Ausgabe.

Nach Seite 22 ist der Gesamtabbrand 1,084 % des Eisengewichts = 280,5 kg. Der Ofen liefert an geschmolzenem Eisen demnach 25 219,5 kg, worin:

23 480,0	kg	Fe
844,9	„	C
547,3	„	Si
148,8	„	Mn
169,5	„	P
29,0	„	S — 25 219,5 kg

1330,0 kg Schlacke mit (s. S. 20):

631,9	kg	SiO_2
271,2	„	FeO
160,1	„	Al_2O_3
204,9	„	CaO
44,2	„	MnO
9,4	„	MgO
5,0	„	P_2O_5 = 1,8 kg P
3,4	„	S — 1 330,0 kg

Zur Bestimmung der Gesamtgasmenge (einschließlich der Kohlensäure aus dem Kalkstein)

* Jüptner sagt: FeS schmilzt bei 950 ° zu einer beweglichen Flüssigkeit. Nach der Erstarrung tritt eine Kontraktion ein, die $^1/_{10}$ des Flüssigkeitsvolumens erreichen kann. Grundzüge der Siderologie, Teil 3, Abt. 1, S. 100.

dient die Durchschnittsanalsye der Gichtgase, wie sie in Zahlentafel 9 angegeben ist. In Gewichtsteile umgerechnet, lautet sie:

19,1 % CO_2	1,2 % O_2
9,7 % CO	70,0 % N_2

1 m³ dieses Gases wiegt 1,354 kg. In diesem Gichtgas sind 70,0 % Stickstoff enthalten, in der atmosphärischen Luft 76,8 %. Da die Stickstoffmenge in beiden dieselbe sein muß, so bildet sich aus einem kg Wind $1 \cdot \frac{76{,}8}{70{,}0}$ kg Gichtgas. Es entsteht also eine Gasmenge von: $19\,423{,}6 \cdot \frac{76{,}8}{70{,}0} = 21\,310{,}4$ kg Gas mit:

4 070,3 kg CO_2	worin 2 960,2 kg O_2	und 1 110,1 kg C
2 067,1 kg CO	„ 1 181,2 „ O_2	„ 885,9 „ C
255,7 „ O_2	„ 255,7 kg O_2	1 996,0 kg C
14 917,2 „ N_2	4 397,1 kg O_2	
21 310,3 kg		21 310,3 kg

Im Gichtgas befinden sich noch geringe Mengen Wasserstoff und Schwefeldioxyd, entstanden einerseits aus dem zersetzten Wasserdampf der Gebläseluft, anderseits aus dem verbrannten Koksschwefel. Ihre Menge:

$232{,}8 \cdot \frac{2}{18} = 25{,}9$ kg H_2	25,9 kg
$\left(25{,}1 - 3{,}5 - 3{,}4 = 18{,}2\right) \frac{64}{32} =$	36,4 kg

(Der vom Eisen und der Schlacke aufgenommene Schwefel geht ab.)

An der Gicht treten nicht gemessene Verluste durch Staub auf. Der Staub setzt sich zusammen aus zerstäubtem Kalk, Sand, Eisen und Kokspartikelchen. Ein Glasstab, der 15 Minuten lang in die Gichtöffnung hineingehalten wurde, war beim Herausholen mit einem 0,5 mm dicken grauweißen Staubansatz bedeckt. (Darin befanden sich unter anderem 10,8 % CaO, 2,45 % S). Der Kalkstein verliert sehr bald seinen Wassergehalt und zerplatzt explosionsartig; dabei zerstäubt ein Teil. Der an der Gicht häufig auftretende weiße Beschlag ist vorwiegend zerstäubter Kalk. Die Menge des Staubes zu messen war aus Mangel an geeigneten Apparaten (der Ofen hat keine Funkenkammer) nicht möglich.

Eine Gegenüberstellung der oben bestimmten Gewichte ergibt folgendes Bild:

Aufnahme.		Abgabe.	
25 500,0 kg	Eisen	25 219,5 kg	Eisen
2 265,0 „	Koks	1 330,0 kg	Schlacke
535,0 „	Kalkstein	21 372,7 kg	Gase
19 656,4 „	Wind + H_2O	78,2 „	Wasserdampf (aus Koks und Kalkstein)
180,0 „	Ausschmiermasse		
48 136,4 kg		48 000,4 kg	

Die Differenz von 136 kg kann als Verlust durch Staub angesehen werden, eine Zahl, welche der Wirklichkeit nahe kommen dürfte.

Auf 100 kg gegichteten Eisens umgerechnet ergeben sich für diesen Vergleich folgende Zahlen:

Aufnahme.		Abgabe.	
100,00 kg	Eisen	98,90 kg	Eisen
8,88 „	Koks	5,22 „	Schlacke
2,10 „	Kalkstein	83,81 „	Gas
77,08 „	Wind + H_2O	0,31 „	Wasserdampf
0,71 „	Ausschmiermasse	0,53 „	Staub.

Die Zahlen sind also Gewichtsprozente vom gegichteten Eisen. Sie werden durch das Schaubild 37, das die stoffliche Einnahme und Ausgabe darstellt, klar veranschaulicht.

Wärmehaushalt.

Auf Grund der gefundenen Werte soll jetzt der Versuch gemacht werden, den Wärmehaushalt des Kuppelofens für die Betriebsdauer von vier Stunden aufzustellen.

Einnahme.

Von dem Gewicht der Kohlensäure, 4070,3 kg, ist der Betrag von 210 kg, aus dem Kalkstein herrührend, abzuziehen. Durch Koksverbrennung werden also gebildet:

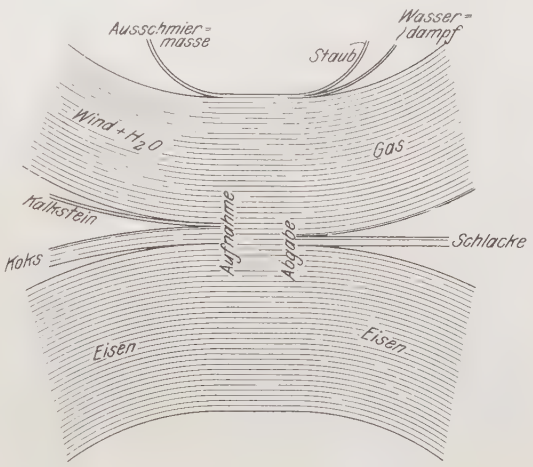

Abb. 37.

3 860,3 kg CO_2 entstanden aus 1 052,8 kg C, welche entwickeln 1052,8 · 8080 = . .	8 506 624 WE
2067,1 kg CO entstanden aus 885,9 kg C, welche entwickeln 885,9 · 2473 =	2 190 831 „
36,4 kg SO_2 entstanden aus 18,2 kg S, welche entwickeln 18,2 · 2220 = . . .	40 404 „
zusammen	10 737 859 „

Durch Verbrennung von:

180,8 kg Fe	zu FeO entstehen	180,8 · 1350 = 244 077 WE
95,3 „ Si	„ SiO_2 „	95,3 · 7830 = 746 183 „
34,8 „ Mn	„ MnO „	34,8 · 1730 = 60 204 „
3,9 „ P	„ P_2O_2 „	3,9 · 5900 = 23 010 „
	zusammen	1 073 474 WE

Der Wärmeinhalt der dem Ofen zugeführten Materialien ist folgender:

Die Tagestemperatur ist 18 °. Mit dieser Temperatur gelangen Eisen, Koks und Kalkstein in den Ofen:

Eisen	25 500 · 0,1298 · 18 =	59 577 WE
Koks	2 265 · 0,2031 · 18 =	8 280 „
deren Feuchtigkeit . .	78,2 · 1,0000 · 18 =	1 408 „
Kalkstein	535 · 0,2099 · 18 =	2 021 „
	zusammen	71 286 WE

Der Wind hat eine Temperatur von 22 °:

Wind.	19 423,6 · 0,2375 · 22 =	101 486 WE
Feuchtigkeit . . .	232,8 · 1,0000 · 22 =	5 122 „
		106 608 WE
	zusammen	177 894 „

Ausgabe.

Unsere Kenntnis der spezifischen Wärmen bei den bei metallurgischen Prozessen auftretenden hohen Temperaturen ist noch recht unvollkommen. Ledebur* gibt als Wärmeinhalt für jedes kg Eisen 285 WE, für jedes kg Schlacke 500 WE an. Der ersten Zahl würde bei einer Schmelzwärme 23 die spezifische Wärme 0,1926 zugrunde liegen. Das Eisen verläßt den Vorherd mit der Durchschnittstemperatur von 1360 ° C (gemessen mit dem Wanner-Pyrometer).

Der Wärmeinhalt von Eisen und Schlacke ist:

Eisen	25 219,5 · 285 =	7 187 500 WE
Schlacke . . .	1 330,0 · 500 =	665 000 „
	zusammen	7 852 500 WE

Die Gase verlassen die Gicht mit durchschnittlich 700 °; dabei entführen sie eine Wärmemenge:**

CO_2 . .	4 070,3 . 700 . 0,2840 =	617 986 WE
CO . . .	2 067,1 . 700 . 0,2637 =	351 033 „
O_2 . . .	255,7 . 700 . 0,2366 =	28 931 „
N_2 . . .	14 917,2 . 700 . 0,2651 =	2 545 760 „
H_2 . . .	25,9 . 700 . 3,7073 =	61 806 „
SO_2 . .	36,4 . 700 . 0,2109 =	3 934 „
	zusammen	3 609 450 WE

Der Wassergehalt der Beschickung hat, wenn auch die Vertreibung dieses Wassers sehr rasch erfolgen wird, die gleiche Temperatur wie die Gichtgase. Sein Wärmeinhalt besteht aus der Verdampfungs- und Ueberhitzungswärme.

$78{,}2 \,.\, (82 + 526 + 600 \,.\, 0{,}4805) =$ . . . . 70 873 WE

Wärmemenge im Staub:

$136{,}0 \,.\, 700 \,.\, 0{,}17 =$ . . . . . 168 184 „

Der Wärmeverbrauch für einzelne Vorgänge im Ofen ist folgender:

Austreiben der Kohlensäure des Kalksteins:

$$210 \cdot 1016 = 213\,360 \text{ WE}$$

Zerlegung des Wassergehalts des Windes:

$$232{,}8 \cdot \left(78 + 5\,363\,600 \cdot 0{,}4805 + 28\,780 \cdot \frac{2}{18}\right) = 954\,480 \text{ WE}.$$

Die Vorwärmung des Kokses und des Windes auf die Verbrennungstemperatur, sowie die Vorwärmung des Eisens und der die Schlacke bildenden Materialien lassen sich zahlenmäßig schwer und nur ungenau erfassen. Zur Bestimmung des Wärmehaushalts genügt der Vergleich der Ofenprodukte in ihrem Anfangs- und Endzustand, so, wie sie in den Ofen gelangen und ihn verlassen. Dabei erhält man folgendes Ergebnis.

Wärmeeinnahme.

Koksverbrennung	10 737 859 WE =	89,56 %	d. Gesamt-
Abbrand d. Eisens	1 073 474 „ =	8,95 %	einnahme
Wassermenge in d. Beschickung .	71 286 „ =	0,60 %	„
Wärmemenge im Wind	106 608 „ =	0,89 %	„
	11 989 227 WE =	100,00 %	d. Gesamteinnahme

Wärmeausgabe.

Im Eisen sind .	7 187 500 WE =	59,95 %	der Gesamt-
In der Schlacke	665 000 „ =	5,55 %	wärmeausgabe
Im Gichtgas. .	3 609 450 WE =	30,11 %	„
In der Feuchtigkeit	70 873 „ =	0,59 %	„
Im Staub . . .	16 184 „ =	0,13 %	„
	11 549 007 WE =	96,33 %	der Gesamtwärmeausgabe

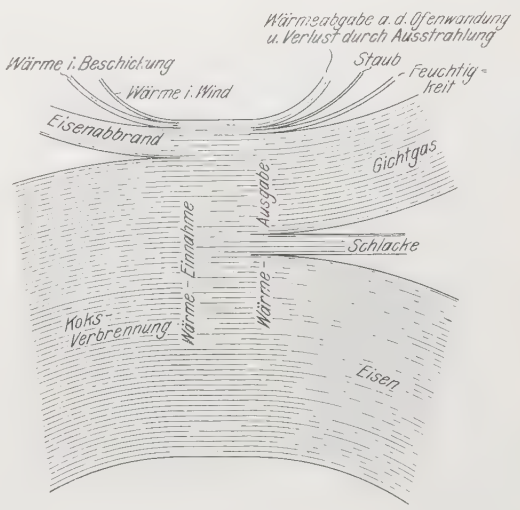

Abb. 38.

Der Unterschied von 440 220 WE oder 3,67 % der Gesamtwärme zwischen der Einnahme und Ausgabe bedeutet Wärmeabgabe an die Ofenwände und Ausstrahlung durch dieselben.

Im Schaubild 38 ist die Wärmezufuhr und -abfuhr im Kuppelofen graphisch zur Darstellung gebracht.

Aus den voraufgehenden Werten über den Wärmehaushalt des Ofens kann man den thermischen Wirkungsgrad des Ofens ableiten, indem man den Wärmeinhalt des Eisens durch die Zahl der Gesamtwärme, welche durch den Koks und den Abbrand erzeugt wurde, dividiert.

$$\frac{\text{Wärmeinhalt des Eisens}}{\text{Wärmemenge d. Verbr. d. Koks u. Roheisens}} = \frac{7187500 \text{ WE}}{11811333 \text{ WE}} = 0{,}608.$$

Der thermische Wirkungsgrad ist also trotz der früher kennen gelernten Mängel noch ein recht guter, wenn man ihn mit demjenigen anderer metallurgischer Oefen vergleicht.

* Ledebur, Handbuch der Eisenhüttenkunde, 5. Aufl., 2. Bd., S. 258; nach Gruner-Steffen, Analyt. Stud. über den Hochofen, S. 129.

** Spezifische Wärmen (bei 700°) nach Beckert, Feuerungskunde 1898.

Entschwefelungsversuche.

Der Schwefel ist der in der Regel am wenigsten gern gesehene Begleiter des Gußeisens. Ihn zu entfernen oder seinen Gehalt zu vermindern ist seit Jahren eine Aufgabe der Gießereimetallurgen. Am Versuchsofen sind Entschwefelungsversuche in kleinem Rahmen gemacht worden, deren Ergebnisse unten mitgeteilt sind.

Der Schwefel ist in unsern mit Kohle heiß erblasenen Metallen nur als Sulfid vorhanden. Jüptner* sagt: „Im Eisen tritt der Schwefel mit Vorliebe als MnS auf, doch erscheint ein Schwefelüberschuß als FeS". Für eine Ausscheidung wäre es nötig, daß das flüssige Eisen für das gebildete Sulfid keine oder nur geringe Lösungsfähigkeit besitzt. Dies trifft auf MnS zu, ebenso auf andere Sulfide, wie CaS, BaS, jedoch nicht auf FeS, welches leichtflüssig und im Eisenbad löslich ist.

Man sucht darum den Schwefel beim Schmelzen an einen der andern Körper zu binden, besonders an Mn und Ca unter Bildung von Mangansulfür oder Schwefelkalzium. Auf welchem Wege die Bildung des Sulfids aus dem Metalloxyd und dem Schwefeldioxyd vor sich geht, ist nicht bekannt. Jedenfalls bildet sich aus dem Koksschwefel, von dem Wüst** nachgewiesen hat, daß er zu 85,2 % in organischer Bindung vorliegt, zunächst Schwefeldioxyd, das hinterher dem reduzierenden Einfluß des hocherhitzten Metalles unterliegt und als Schwefelmetall in Lösung geht, teils mit dem Eisen, zum andern Teil mit der Schlacke.

Die Reaktion $FeS + CaO = CaS + FeO$ ist nur möglich bei Gegenwart eines dritten Körpers, der oxydiert wird (z. B. Si, C, im Kuppelofen bes. C):

$$FeS + CaO + C = CaS + Fe + CO.$$

Eisenoxyd im Eisenbad würde den Schwefel wieder an sich reißen unter Neubildung von CaO. Im Kuppelofen läßt sichs nun nicht vermeiden, daß ein Teil des Eisens oxydiert. Das ist ein Grund, warum eine völlige Entschwefelung des Eisens ausgeschlossen ist. Die Aufgabe ist darum die, den Schwefelgehalt möglichst zu reduzieren.

Das Schmelzen im Versuchsofen erfolgte in der Regel so, daß der besseren Wärmeentfaltung halber kein Kalk zum Füllkoks zugeschlagen wurde. Das zuerst fallende Eisen ist dann stets sehr schwefelreich (0,15 bis 0,19 % S beim ersten Abstich; vgl. Zahlentafeln 31 und 32). Allmählich geht der Schwefelgehalt auf ein geringeres Maß (0,09 bis 0,11 % S) zurück. Die Unterlassung des Zuschlags ist darum verwerflich. Das erste Eisen ist sonst weiß und spröde.

Angeregt durch die vorzüglichen Ergebnisse von Wüst-Sulzer-Großmann† mit Manganerz (49,47 % Mn), welche mit einem Herbertz-Ofen angestellt wurden, wurde versucht, mit diesem Erz im Versuchsofen Nutzanwendung zu machen. Die Verhältnisse gestatteten leider nicht, die Versuche in großem Rahmen anzustellen. Das Ergebnis war ein auffälliges.

1. Füllkoks (1000 kg) erhielt 75 kg Mn-erz = 7,5 % des Koksgewichtes. Jeder Satz 10 kg Mn-Erz = 24 % des Koksgewichtes.

Siehe Zahlentafel 39.

Zahlentafel 39.

Zeit nach Blasebeginn	Art der Probe	v. H. S	Bemerkung
12′	—	—	Erstes Eisen erscheint
15′	Ablaufkanal	0,114	
40′	1. Abstich	0,172	
1h 05′	2. ,,	0,172	
1h 25′	4. ,,	0,120	

2. Füllkoks (1000 kg) kein Zuschlag. Jeder Satz 12 kg Mn-Erz = 29 % des Koksgewichts.

Siehe Zahlentafel 40.

Zahlentafel 40.

Zeit nach Blasebeginn	Art der Probe	v. H. S
35′	1. Abstich	0,130
45′	2. ,,	0,110
1h 00′	3. ,,	0,122
1h 15′	4. ,,	0,126
1h 30′	5. ,,	0,112

Der Koks enthielt bei diesen Schmelzungen 1,09 % S. Es fällt auf, daß der Schwefelgehalt im Eisen zur Zeit des reduzierenden Zustandes im Ofen sein Minimum erreicht, dann wieder infolge der Einwirkung der Füllkoksmenge etwas ansteigt, um darauf auf einen Beharrungszustand herabzusteigen, der um 0,1 % schwankt. Der erhoffte Erfolg mit Manganerz blieb aus. Vielleicht sind die Zustände im Ofen für die Entschwefelung mit Braunstein nicht geeignet, ein Ergebnis, das die Versuche am Kuppelofen in Sterkrade, welche von Wedemeyer* angestellt wurden, auch zeitigten. Die besseren Ergebnisse mit Kalkstein gehen aus den Resultaten der Versuche, die in Zahlentafel 27 mitgeteilt sind, hervor.

Es wurden verschiedene Versuche mit einem Mittel ausgeführt, das theoretisch nicht einwandfrei erscheint, um den Schwefel am Uebergang ins Eisen zu hindern: Die Beschickung erhielt einen Zuschlag von Rasenerz. Es wurde gerade dieses Eisenerz

* Jüptner, Grundzüge der Siderologie, I, 3, S. 98.
** Mitt. d. Eisenh. Inst. der Technischen Hochschule Aachen, 1906, S. 86.
† St. u. E. 1903, S. 1134.

* St. u. E. 1904, S. 1316 u. f.

gewählt, weil es voluminös ist, wegen seiner Zusammensetzung leicht verschlackt und den Vorzug der Billigkeit hat. Die Analyse des Rasenerzes ergab u. a.: 28,81 % Fe, 0,89 % Mn, 1,105 % P. Das Erz stammte aus Liebenwerda und war von mulmiger Beschaffenheit.

1. Füllkoks (1000 kg) 100 kg Rasenerz = 10 % des Koksgewichts. Jeder Satz 10 kg Rasenerz = 23,8 % des Koksgewichts + 10 kg Kalkstein = 23,8 % des Koksgewichts.

   Siehe Zahlentafel 41.

Zahlentafel 41.

Zeit nach Blasebeginn	Art der Probe	v. H. S
35′	1. Abstich. Anfang	0,142
35′	1. „ Ende	0,149
40′	2. „	0,126
50′	3. „	0,120
1h 00′	4. „	0,088
1h 10′	5. „	0,091

2. Füllkoks (1000 kg) 150 kg Rasenerz = 15 % des Koksgewichts. Jeder Satz 10 kg Rasenerz = 23,8 % des Koksgewichts + 10 kg Kalkstein = 23,8 % des Koksgewichts.

   Siehe Zahlentafel 42.

Zahlentafel 42.

Zeit nach Blasebeginn	Art der Probe	v. H. S
15′	Ablaufkanal	0,160
1h 10′	1. Abstich. Anfang	0,112
1h 10′	1. „	0,134
1h 10′	1. „	0,116
1h 10′	1. „ Ende	0,128

Der Ofen ging eine Stunde früher in Betrieb, als vorgesehen, war also schlecht vorgewärmt bei diesem Versuch 2. Das hatte zur Folge, daß sich der Ablaufkanal mit zu früh erstarrender Schlacke zusetzte, und der Wind die sich unten im Ofen ansammelnde Schlacke kalt blies. Erst nachdem die Oeffnung gewaltsam wieder hergestellt war, verlief der Schmelzprozeß ordnungsmäßig. Beim Abstich der Schlacke war diese letztere nunmehr gut gemischt und dünnflüssig, so daß sie leicht aus dem Vorherd auslief.

3. Füllkoks kein Zuschlag.

   Satzkoks: zuerst 10 Sätze mit 10 kg Kalkstein = 23,8 % des Koksgewichts. Darauf mit 10 kg Rasenerz = 23,8 % des Koksgewichts.

   Siehe Zahlentafel 43.

Aus den vorstehenden Versuchen geht hervor, daß Rasenerz als Entschwefelungszuschlag verwendbar ist. Wohl ist seine Wirkung, wie diese wenigen Versuche zu beweisen scheinen, nicht so durchgreifend, wie die des Kalksteins. Die Erklärung für seine Wirksamkeit scheint darin zu liegen, daß die Schlacke durch den Eisenoxydulzuschlag dünnflüssiger und basischer wird, somit für Schwefel eine größere Aufnahmefähigkeit erhält. Ist nun der Träger des Schwefels das lösliche FeS, so tritt dieses doch nicht vollständig ins Eisen über. Es bildet sich vielmehr zwischen den beiden flüssigen Lösungskomponenten ein Gleichgewichtsverhältnis (Teilungsfaktor!), und ein gewisser Teil des Sulfürs wandert in die Schlacke.

Zahlentafel 43.

Zeit nach Blasebeginn	Art der Probe	v. H. S
1h 00′	1. Abstich	0,136
1h 10′	2. „	0,126
1h 30′	„	0,096
2h 00′	„	0,096
2h 36′	„	0,108
3h 00′	„	0,108
3h 20′	„	0,100

Bei der Verwendung des Rasenerzes, das stets Phosphate enthält, ist eine Begleiterscheinung der Uebergang von P in das Eisen. So hatten z. B. die Eisenproben der Zahlentafel 42 einen mittleren Gehalt von 0,795 P. In demselben Eisen einer Gegenprobe vom nächsten Tag, an dem ohne Erzzuschlag geschmolzen wurde, war nur 0,586 % P enthalten. Für Potterieguß mag das unbedenklich, vielleicht manchmal erwünscht sein. Bei anderen Gußarten würde man Brauneisenstein oder ähnliche Erze verwenden, die phosphorfrei sind. Das Rasenerz würde als Zuschlagmittel da in Frage kommen können, wo Kalk im Umkreise fehlt, das Erz aber gefunden wird, namentlich, wenn die Transportkosten für Kalkstein hoch sind.

Es wäre interessant, über eisenführende Zuschläge beim Kuppelofenschmelzen durch Versuche in größerem Maßstabe völlige Klarheit zu schaffen.

Einen auffallenden Einfluß hat Kochsalz auf das Schmelzen im Kuppelofen. Es wirkt, wie mehrere Versuche bewiesen, so auf das Eisen ein, daß sich dieses mehr mit Schwefel sättigt, als dies sonst der Fall ist. Um das Salz bis in die Schmelzzone des Ofens hinab gelangen zu lassen, wurden aus 500 kg denaturiertem Kochsalz Briketts von je 3,3 kg unter einem Druck von 200 at hergestellt. Auf diese Weise gelang es, das Salz trotz seines niedrigen Schmelz- (776 °) und Verdampfungspunktes bis in die heiße Zone des Ofens zu bringen. Ein großer Teil schmolz auf dem Wege bis dahin ab und verflüchtigte sich, dabei die Abzugsgase mit dickem weißem Nebel erfüllend.

1. Füllkoks 33,3 kg NaCl = 3,3 % des Koksgewichts. Jeder Satz 5,3 kg NaCl = 12,6 % des Koksgewichts.

   Siehe Zahlentafel 44.

Zahlentafel 44.

Zeit nach Blasebeginn	Art der Probe	v. H. S	Bemerkungen
30′	1. Abstich	0,228	
1h 00′	,,	0,176	
1h 40′	,,	0,130	
2h 35′	,,	0,137	
3h 30′	,,	0,114	
4h 20′	,,	0,137	

2. Füllkoks 150 kg Mn-Erz = 15 % des Koksgewichts + 33,3 kg NaCl = 3,3 % des Koksgewichts. Jeder Satz 10,9 kg Mn-Erz = 26 % des Koksgewichts + 10,6 kg NaCl = 25,3 % des Koksgewichts.

Siehe Zahlentafel 45.

Zahlentafel 45.

Zeit nach Blasebeginn	Art der Probe	v. H. S	Bemerkung.
40′	Ablaufkanal	0,180	
51′	,,	0,158	
59′	1. Abstich. Anfang	0,156	
1h 03′	1. ,, Ende	0,149	
1h 25′	Abstich	0,144	
1h 45′	,,	0,127	
2h 20′	,,	0,126	

Das Eisen weist in beiden Fällen einen hohen Gehalt an Schwefel auf. Natriumchlorid ist als Entschwefelungsmittel nicht verwendbar.

Bei allen Entschwefelungsversuchen erleidet die Temperatur des Eisens eine geringe Einbuße infolge des Wärmeaufwands für die zu verflüssigenden Zuschläge.

Schlußbemerkung.

In der vorstehenden Arbeit ist auf experimentellem Wege versucht worden, den Kuppelofenschmelzprozeß in seinen Einzelheiten näher kennen zu lernen. Die Schlußfolgerungen aus den Untersuchungen sind an den entsprechenden Stellen im Text ausführlich besprochen.

An Wirtschaftlichkeit des Betriebes kann sich der Kuppelofen mit der größten Mehrzahl von Hüttenwerksöfen messen, ein Umstand, der in der innigen Berührung von Brennstoff und Schmelzmaterial seine Ursache hat. Es ist aber mit Bezug auf die Oekonomie des Betriebes zu bemerken, daß, wenn eine Kuppelofenanlage auch mit Benutzung aller Erfahrungen aus der Praxis und Theorie ausgebaut wird, ein guter Ofengang beeinträchtigt wird durch unangebrachte Behandlung, z. B. durch ungleich schwere Eisen- und Koksgichten (wenn das Gewicht statt mit der Wage durch das Gefühl bestimmt wird), durch die Aufgabe zu wenig zerkleinerter Bruch- oder Roheisenstücke, durch starken Wechsel der Windmenge durch zu umfangreiches Verschlackenlassen der Düsen.

Zur Aufrechterhaltung der Wirtschaftlichkeit einer guten Kuppelofenanlage ist eine gewissenhafte Kontrolle aller Betriebseinzelheiten geboten.

Es sei mir gestattet, an dieser Stelle der Firma A. Borsig in Tegel, in deren Werk diese Arbeit entstanden ist, für die Erlaubniserteilung, sowie insbesondere Herrn Generaldirektor Neuhaus für das bewiesene Wohlwollen meinen herzlichsten Dank abzustatten. Ferner ist es mir eine angenehme Pflicht, den Herren Dipl.-Ing. Leber und Escher, in deren Betrieb die Versuche angestellt wurden, hier nochmals herzlichst zu danken.

Gedruckt bei August Bagel in Düsseldorf.